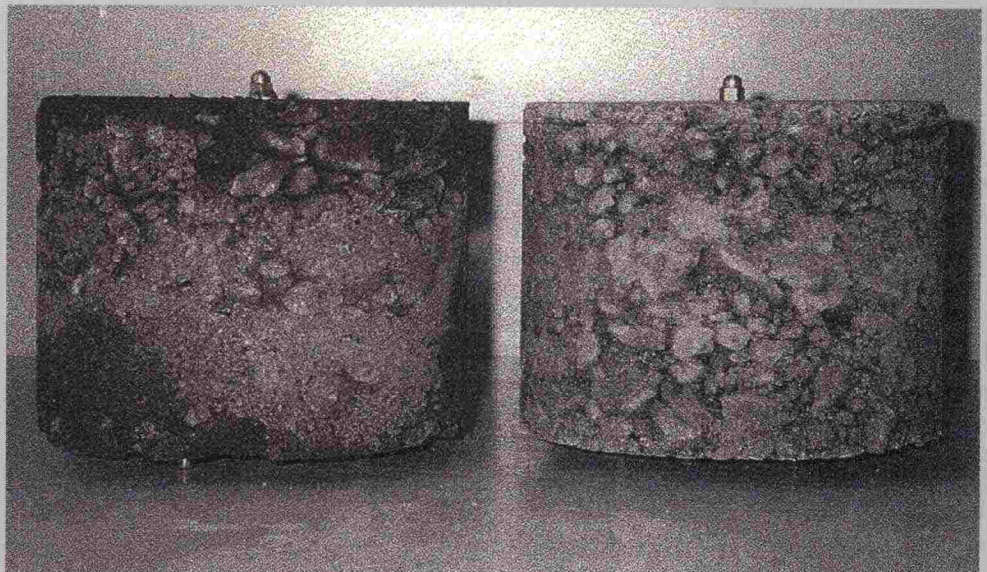


Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 2

Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis -
sulamiskestävyys



Tielaitoksen selvityksiä
24/1998

Kirsi Ylipiessa

Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 2

**Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis -
sulamiskestävyys**

Tielaitos
TUOTANTO, konsultointi

Oulu 1998

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-438-0
TIEL 3200515
Oy Edita Ab
Helsinki 1998

Julkaisun myynti:
Tielaitos, kirjasto
Telefax 0204 44 2652

Joutsenmerkin arvoinen paperi



Tielaitos
TUOTANTO
Opastinsilta 12 B
PL 157
00521 HELSINKI
Puh. vaihde 0204 44 150

Konsultointi
Oulun kehitysyksikkö
Vanhantullinkatu 2
PL 261
90101 OULU
Puh. vaihde 0204 44 158

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyyttä laboratoriotutkimuksin. Runkoaineina olivat savi, neljä moreenia sekä viisi kalliomursketta. Sideaineena oli Finnsementti Oy:n yleissementti CEM II A 42,5. Koska nykyiset laatukriteerit alittavien materiaalien käyttö tienrakennuksessa tulee tulevaisuudessa lisääntymään, suuri osa tutkimukseen valituista materiaaleista oli tienrakennukseen sellaisenaan joko rakeisuuden tai kiviaineksen laadun vuoksi sopimattomia materiaaleja.

Tutkimuksen lähtökohtana olivat nykyiset sementtistabilointia koskevat ohjeet, joiden mukaisesti kullekin runkoaineelle suoritettiin ennakkokokeita. Ennakkokokeiden perusteella valittiin kullekin runkoaineelle kolme sementtipitoisuutta, joita käytettiin jäätymis-sulamiskestävyyskokeissa.

Jäätymis-sulamiskokeet suoritettiin saksalaisten ohjeiden / 13/ ja / 14/ mukaan, joissa koekappaleet altistetaan toistuville jäätymis-sulamissykleille (12 kpl). Koe perustuu koekappaleiden pituuden muutoksen mittaamiseen, mutta tässä tutkimuksessa samalla tavoin rasitetuista koekappaleista määritettiin myös mekaanisia ja fysikaalisia ominaisuuksia sekä tilasuureita. Jäätymis-sulamissykliä vaikutusta em. ominaisuuksiin selvitettiin vertaamalla kokeen jälkeen määritettyjä ominaisuuksia vastaavalla tavalla valmistetuista 28 vrk:n ikäisistä koekappaleista määritettyihin ominaisuuksiin.

Koekappaleiden pituuden muutoksen mittaaminen näyttäisi soveltuvan stabiloitujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyuden määrittämiseen. Suurimman sallitun laajenemisen perusteella voidaan yksiselitteisesti määrittää jäätymis-sulamiskestävyuden takaava sementtipitoisuus.

Yksiaksiaalinen puristuskoe on tienrakennuksessa paljon käytetty sidottujen materiaalien laadunvarmistusmenetelmä sen yksinkertaisen ja helpon suoritustavan johdosta. Tutkimuksen tulosten perusteella puristuslujuudelle ei kuitenkaan ole olemassa mitään tiettyä rajaa, joka takaisi jäätymis-sulamiskestävyuden. Suurimmalle osalle materiaaleista näyttäisi tietyn lujuustason sijaan sementtipitoisuus 3-5 % olevan riittävä puristuslujuuden jäätymis-sulamiskestävyuden kannalta.

Myös M_r -moduuli ja sen muutokset jäätymis-sulamiskokeissa näyttäisivät lujuustason sijaan olevan riippuvaisia sementin määrästä.

Jäädytys-sulatussykleillä ei ollut vaikutusta sementillä stabiloitujen materiaalien lämmönjohtavuuteen. Vesipitoisuus kasvoi kokeen aikana sitä enemmän mitä hienoaainespitoisempi materiaali oli. Sementin määrän lisääminen pienensi absorboituneen veden määrää.

Sementillä stabiloitujen materiaalien huokoisuudet kasvoivat runkoaineen hienoainespitoisuuden kasvaessa. Rakeisuudeltaan nykyisten stabilointiohjeiden mukaisilla runkoaineilla huokoisuus oli n. 10-15 %. Jäädytys-sulatuskokeen läpi ehjänä säilyneiden koekappaleiden huokoisuudet eivät kokeen aikana juurikaan muuttuneet.

Tutkimustulosten perusteella nykyisten stabilointiohjeiden mukainen 5 MPa puristuslujuus 7 vrk:n iässä ei riitä takaamaan sementtistabiloinnin jäätymis-sulamiskestävyyttä. Jäätymis-sulamiskestävyyttä ajatellen Sementtistabilointiohjeen / 12/ suosittama sementtipitoisuuden alaraja 3,5 % soveltuu käytettäväksi kalliomurskeille, joiden hienoainespitoisuus on pieni. Moreene- ja stabiloitaessa alarajaa on jäätymis-sulamiskestävyyden varmistamiseksi kuitenkin kasvatettava 1-2 %-yksiköllä runkoaineen hienoainespitoisuudesta riippuen.

Key words: road structure, structure layer, cement stabilization

ABSTRACT

This study investigated freeze-thaw durability of cement bound materials using laboratory test. Aggregates included clay, four till samples and five samples of crushed rock. Cement CEM II A 42,5 by Finnsementti Ltd was used as a binding agent. As the use of materials that don't meet current quality criteria will increase in road construction in the future, the majority of the materials chosen for this study were not as such suitable for road construction, either because of their gradation or quality of aggregate.

The present cement stabilization codes were used as a basis for this study. According to them, pre-tests were done on each aggregate. Based on these pre-tests, three cement contents were chosen for each aggregate and they were used in freeze-thaw durability tests.

The freeze-thaw durability tests were carried out according to German codes / 13/ and / 14/ where test samples are exposed to repetitive freeze-thaw cycles (total of 12 cycles). The test is based on measuring the change of length of test samples, in this research however also mechanical and physical properties and state variables were determined from test samples that had been under identical stress. The effect of freeze-thaw cycles on these properties were studied by comparing properties determined after the test to properties of similarly prepared samples at the age of 28 days.

Measuring the change of length of the test samples seems to be a suitable method to determine the freeze-thaw durability of stabilized materials. Based on the maximum allowable swelling the necessary cement content to produce freeze-thaw durability can be unambiguously determined.

Direct axial testing is a lot used quality control method with cement bound materials in road construction due to its simplicity and ease of accomplishment. However, based on the research results compressive strength has no certain limit which would guarantee freeze-thaw durability. For most materials, instead of a particular strength level the cement content of 3-5% seemed to provide a sufficient freeze-thaw durability of compressive strength.

Similarly, M_r -modulus and its changes in the freeze-thaw tests seemed to depend on the cement content instead of strength levels.

Freeze-thaw cycles had no effect on the thermal conductivity of cement stabilized materials. The bigger the amount of fines was in the material the more the water content increased during the test. The increase in the amount of cement decreased the amount of absorbed water.

Porosity of cement stabilized materials increased when the amount of fines increased in the aggregate. Porosity for aggregates that meet the present

stabilization codes was approx. 10-15 %. Porosity for those samples that remained unbroken through the freeze-thaw durability test did not change much.

Based on the research results the compressive strength of 5 MPa at the age of 7 days according to the present stabilization codes is not sufficient to guarantee freeze-thaw durability of cement stabilization. If freeze-thaw durability is considered, the minimum cement content of 3,5% recommended by the Cement Stabilization Codes /13/ is applicable on rock crushes with small amount of fines. When stabilizing tills, to guarantee freeze-thaw durability the minimum must be increased by 1-2%-units depending on the amount of fines in the aggregate.

ALKUSANAT

Tielaitoksen Oulun kehitysyksikkö käynnisti hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistusta käsittelevän tutkimuksen osana kerrosrakenteiden laadunvarmistuksen kehittämistä vuonna 1996.

Tutkimus aloitettiin sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskäyttäytymistä koskevalla tutkimuksella. Syynä tutkimuksen aloittamiseen olivat tielaitoksen sementtistabilointiohjeissa todetut puutteet. Ohjeistosta puuttuu mm. laadunvarmistusohjeet siitä, miten tierakenteen jäätymis-sulamislmiöstä aiheutuvat hydraulisesti sidottujen kerrosten vaurioitumisriskit tulisi ehkäistä. Lisäksi ohjeistosta puuttuu kokonaan heikkolaa-tuisille materiaaleille tarkoitetut laatuksiteerit, joiden tarve korostuu entises-tään sidottujen rakenteiden ja heikkolaatuisten materiaalien käytön lisäänty-essä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten toistuvat jäätymis-sulamissyklit vaikuttavat eri tyyppisten sementillä sidottujen materiaalien routakestävyv-teen, lujuuteen ja muodonmuutosominaisuuksiin sekä sidotun kantavan ker-roksen pitkäaikaikäkäyttäytymiseen. Lisäksi tavoitteena oli selvittää laborato-rio-olosuhteissa tehtävien koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen merki-tys sementillä sidotun materiaalin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Tutkimuksen tuloksena laaditaan suositukset sementillä sidottujen materiaa-lien jäätymis-sulamiskäyttäytymisen laatuksiteereistä sekä niiden edellyttä-mistä laboratoriotutkimuksista ja laadunvalvonnasta.

Tutkimuksen on tilannut tielaitoksen tie- ja liikennetekniikan yksikkö (Htl) ja rahoittanut tielaitos ja Finnsementti Oy. Tutkimus on tehty diplomityönä Ou-lun yliopiston geotekniikan laboratoriossa. Tehdyn diplomityön aineistosta on laadittu kolme erillistä raporttia, jotka on julkaistu tielaitoksen julkaisusarjas-sa. Raportit on kirjoittanut diplomityöntekijä tekn. yo Kirsi Ylipiessa. Nyt käsil-lä oleva raportti on julkaisusarjan toinen osa, jossa käsitellään sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyyttä. Muut osaraportit ovat:

- Sementillä sidotut materiaalit, kirjallisuusselvitys
- Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen

Työn ohjauksesta ja valvonnasta on vastannut ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet TkT Kauko Kujala Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa, DI Kurt Lundström Finnsementti Oy:stä sekä DI Seppo Salmenkaita ja Ins. Heikki Vesa tielaitoksen konsultoinnin Oulun kehitysyksiköstä.

Oulussa kesäkuussa 1998

Konsultointi

Oulun kehitysyksikkö

SISÄLLYSLUETTELO	7
1 JOHDANTO	9
2 TUTKIMUKSEN VAIHEISTUS	10
3 TUTKIMUSMATERIAALIT	11
3.1 Runkoaineet	11
3.2 Sideaine	12
4 TUTKIMUSMENETELMÄT	13
4.1 Runkoaineiden ominaisuuksien määrittäminen	13
4.1.1 Raekokojakauma	13
4.1.2 Humuspitoisuus	13
4.1.3 Humusluokka	13
4.1.4 Humus- ja fulvohappojen fraktiointi	13
4.1.5 pH	13
4.1.6 Sähkönjohtavuus	14
4.1.7 Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus	14
4.1.8 Plastisuus	14
4.1.9 Kiintotiheys	14
4.1.10 Kapillaarisuus	15
4.1.11 Vedenadsorptioluku	15
4.1.12 Vedenpidätyskyky	15
4.1.13 Hienoainoksen ominaispinta-ala	15
4.1.14 Kuulamylyarvo	15
4.1.15 Liuskeisuus	16
4.1.16 Mineraalikoostumus	16
4.2 Ennakkokokeet	17
4.2.1 Puristuskoekappaleet	17
4.2.2 Massojen valinta jäädytys-sulatuskokeisiin	18
4.3 Jäädytys-sulatuskokeet	19
4.3.1 Massojen tilavuuspaino	19
4.3.2 Koemenetelmä	20
4.3.3 Pituuden muutos	22
4.3.4 Puristuslujuus	25
4.3.5 Staattinen kimmomoduuli	25
4.3.6 Dynaaminen kimmomoduuli	26
4.3.7 Halkaisuvetolujuus	29
4.3.8 Lämmönjohtavuus	29
4.3.9 Vesipitoisuus	30
4.3.10 Huokoisuus	31
4.3.11 Vedenläpäisevyys	31
5 TUTKIMUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	32
5.1 Runkoaineet	32

5.1.1 Raekokojakauma	32
5.1.2 Humuspitoisuus ja humusluokka	32
5.1.3 Humus- ja fulvohapot	32
5.1.4 pH	32
5.1.5 Sähkönjohtavuus	33
5.1.6 Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus	33
5.1.7 Plastisuus	34
5.1.8 Kiintotiheys	34
5.1.9 Kapillaarisuus	34
5.1.10 Vedenadsorptioluku ja -pidätyskyky	34
5.1.11 Hienoaineksen ominaispinta-ala	34
5.1.12 Kuulamylyarvo	35
5.1.13 Liuskeisuus	35
5.1.14 Mineraalikoostumus	35
5.2 Ennakkokokeiden tulokset	35
5.2.1 Puristuslujuus	35
5.2.2 Massojen valinta jäädytys-sulatuskokeisiin	39
5.3 Jäätymis-sulamiskestävyys	39
5.3.1 Massojen tilavuuspaino	39
5.3.2 Pituuden muutos	40
5.3.3 Puristuslujuus	46
5.3.4 Staattinen kimmomoduuli	49
5.3.5 Dynaaminen kimmomoduuli	51
5.3.6 Halkaisuvetolujuus	57
5.3.7 Lämmönjohtavuus	59
5.3.8 Vesipitoisuus	61
5.3.9 Huokoisuus	66
5.3.10 Vedenläpäisevyys	67
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	69
7 KIRJALLISUUS	72
8 LIITTEET	74

1 JOHDANTO

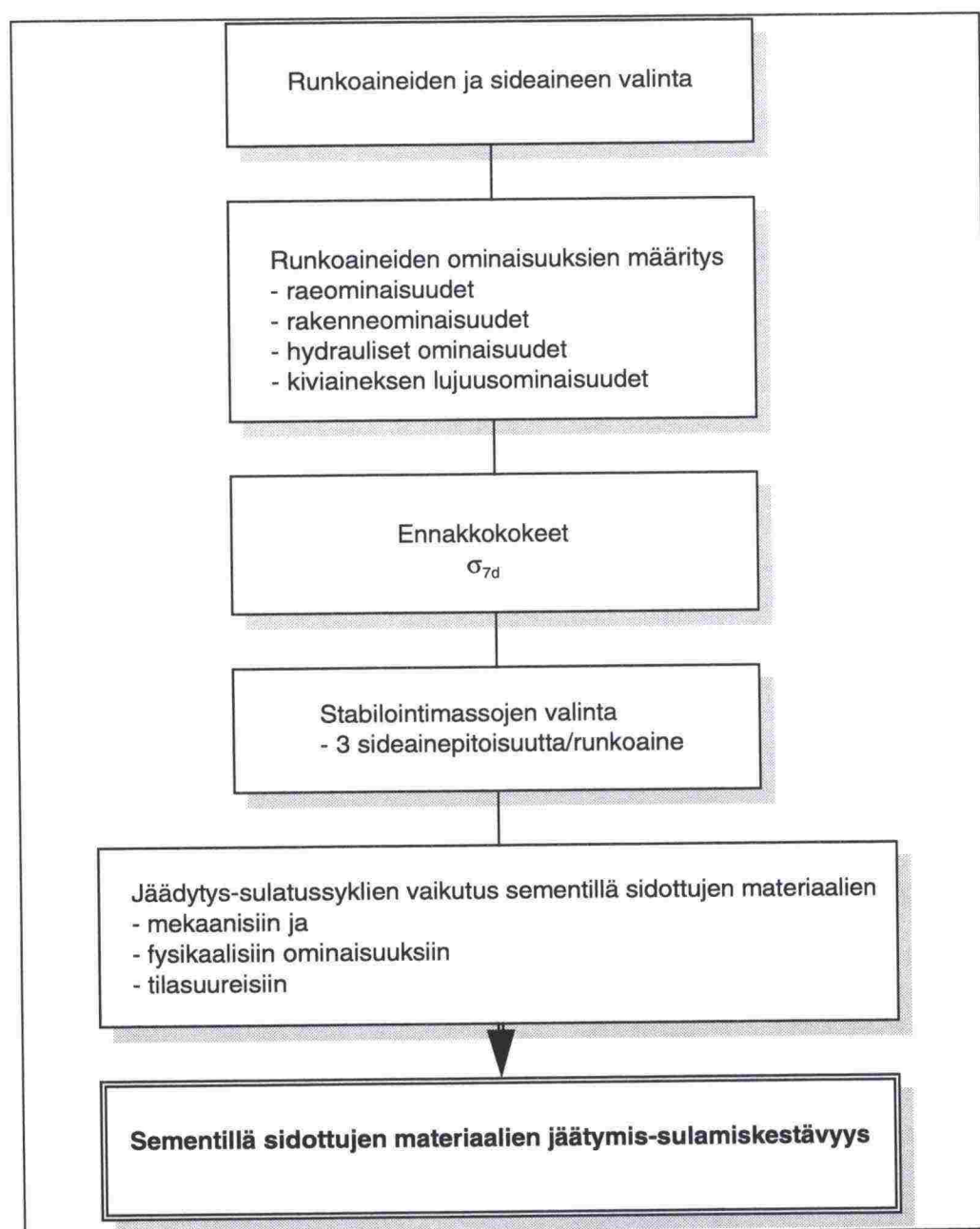
Tienpidon painopisteen siirtyessä yhä enemmän tieverkon kunnon ylläpitoon, korostuu tiessä olevien materiaalien uudelleenkäyttö yhdessä paikallisten materiaalien kanssa. Myös kestävän kehityksen periaatteet ohjaavat materiaalien käyttöä. Perinteisten hyvälaatuisten luonnonmateriaalien käyttö vähenee, niiden käytölle asetetaan rajoituksia ja samalla niiden saatavuus vaikeutuu. Korvaavien, nykyiset laatukriteerit alittavien, materiaalien käyttö tulee tästä syystä lisääntymään. Merkittäväksi vaihtoehdoksi materiaalien hankinnassa tulee rakennuspaikalta tai sen välittömästä läheisyydestä saatavien materiaalien käyttö. Laadun parantamiseksi materiaali joudutaan usein käsittelemään joko mekaanisesti tai sitomalla se jonkin sideaineen avulla.

Uusien materiaalien käyttö edellyttää ajantasalla olevia laatukriteerejä ja niihin liittyviä tutkimusmenetelmiä. Sidotun rakennekerroksen suunnittelussa ei riitä nykyisin Suomessa käytettävä yksinomaan puristuslujuuteen perustuva mitoituskriteeri, vaan huomioon on otettava myös ilmasto-olosuhteiden aiheuttamat rasitustekijät.

Suomen ilmasto-olosuhteissa materiaalit altistuvat tierakenteessa vuosittain toistuville jäätymis-sulamissykleille. Jäätymis-sulamiskokeita on käytetty viime vuosina ainoastaan muutamissa tutkimuksissa ja materiaaleina tällöin ovat olleet pääasiassa moreenimurskeet. Jäätymis-sulamiskokeiden ensisijaisena tarkoituksena on ollut selvittää hydraulisilla sideaineilla sidotun rakenteen kykyä vastustaa rapautumista. Pakkasrasituksen todellista vaikutusta tierakenteessa määritykset kuvaavat enintään tyydyttävästi. Koestusmenetelmiä ja olosuhteita tulisi kehittää myös siten, että ne kuvaisivat lujittumisen aikaisten olosuhdetekijöiden, kuten esim. lämpötilavaihtelujen vaikutusta varhaislujuuteen sekä rakenteen pitkäaikaista lujuus- ja muodonmuutokäyttäytymistä. Kokeiden tulisi olla sekä pakkasrasituksen laadullisia vaikutuksia kuvaavia helposti suoritettavia nopeita indeksikokeita että ilmiön kvantitatiivista vaikutusta arvioivia nopeutettuja mallikokeita.

2 TUTKIMUKSEN VAIHEISTUS

Tutkimus aloitettiin runkoaineiden ja sideaineen valinnalla (Kuva 1). Valitusta runkoaineista määritettiin rae-, rakenne- ja hydraulisia ominaisuuksia sekä kiviaineksen lujuusominaisuuksia. Tutkimuksessa käytettävät sideainepitoisuudet määritettiin ennakkokokeiden avulla. Ennakkokokeena käytettiin 7 vuorokauden ikäisille stabiloiduille näytteille suoritettua yksiaksiaalista puristuskoea. Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyyttä selvitettiin syklisen jäädytys-sulatuskokeen avulla. Tutkimuksessa määritettiin jäädytys-sulatussykliä vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin, tilasuureisiin sekä fysikaalisiin perusominaisuuksiin.

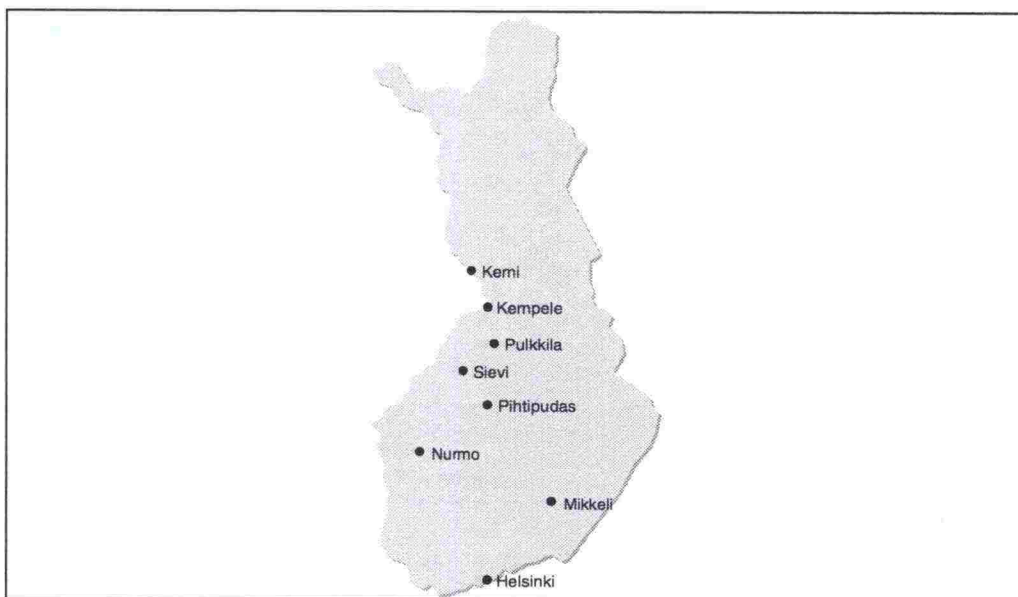


Kuva 1: Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyys -tutkimuksen vaiheet.

3 TUTKIMUSMATERIAALIT

3.1 Runkoaineet

Tutkimuksessa stabiloitavina runkoaineina olivat savi, neljä moreenia ja viisi kalliomursketta. Materiaalit hankittiin eri puolilta Suomea (Kuva 2).



Kuva 2: Tutkimusmateriaalien hankintapaikat.

Savi hankittiin Helsingistä Viikki-Latokartanon alueelta. Materiaali oli lihavaa savea ja siitä käytettiin laboratoriokokeissa tunnusta s1.

Moreenien valintakriteereinä olivat esiintymisyleisyys sekä hienoaineksen määrä. Luonnonmoreenien lisäksi tutkimukseen valittiin yksi moreenimurske. Tutkimukseen valitut moreenit on nimetty hankintapaikan mukaan ja niistä on laboratoriokokeissa käytetty seuraavia tunnistusmerkin­to­jä:

m1	Pihtipudas, Lahdenpohja (MrM)
m2	Pihtipudas, Lahdenpohja (srHkMr)
m3	Pulkila, Uljua (siHkMr)
m4	Kempele, Linnakangas (siHkMr)

Moreenimurske m1 on murskattu luonnonmoreenista m2.

Tutkittavat kalliomurskeet valittiin siten, että ne lujuusominaisuuksiltaan edustaisivat sekä hyvä- että heikkolaatuisia materiaaleja. Kalliomurskeisiin päädyttiin soramurskeiden sijaan myös kalliokiviaineksen laadun ja laatu­muutosten paremman ennakoitavuuden vuoksi. Kalliomurskeet on nimetty hankintapaikan mukaan ja niistä on laboratoriokokeissa käytetty seuraavia tunnistusmerkintöjä:

M1	Nurmo, Ala-autio
M2	Kemi, Elijärvi
M3	Kempele, Linnakangas
M4	Sievi, Korianmäki
M5	Mikkeli, Tikkala

Tutkimusmateriaalien ominaisuudet on esitetty liitteellä 1.

3.2 Sideaine

Sideaineena kaikilla materiaaleilla käytettiin Finnsementti Oy:n yleissementtiä CEM II A 42,5. Sementti sisältää portlandklinkkeriä 80-94 % ja seosainetta 6-20 %.

4 TUTKIMUSMENETELMÄT

4.1 Runkoaineiden ominaisuuksien määrittäminen

4.1.1 Raekokojakauma

Materiaalien rakeisuudet määritettiin Geoteknisten laboratorio-ohjeiden (GLO-85) / 5/ mukaan. Moreeneilla ja kalliomurskeilla seulonta suoritettiin pesuseulontana ja moreenien hienoaineksen rakeisuus määritettiin areometrikokeella. Saven rakeisuus määritettiin areometrikokeella. Yli 32 mm rakeet poistettiin, jolloin sadan prosentin läpäisyraja asetui # 32 mm kohdalle.

4.1.2 Humuspitoisuus

Runkoaineiden humuspitoisuus (orgaanisen aineksen määrä) määritettiin polttomenetelmällä GLO-85:n / 5/ mukaan kahdelle rinnakkaisnäytteelle. Tarvittaessa määrittämiä tehtiin enemmän. Lopullinen humuspitoisuus saatiin laskemalla rinnakkaisnäytteiden polttohäviöiden keskiarvo.

4.1.3 Humusluokka

Moreenien ja kalliomurskeiden humusluokka määritettiin NaOH-kokeella GLO-85:n / 5/ mukaan kahdelle rinnakkaisnäytteelle. Jos tuloksissa oli eroja, lopulliseksi humusluokaksi valittiin huonompi. Saven humusluokkaa ei määritetty.

4.1.4 Humus- ja fulvohappojen fraktiointi

Humus- ja fulvohappojen fraktiointi suoritettiin Geologian tutkimuskeskuksessa (GTK). Määrittämiset suoritettiin savelle sekä moreeneille rakeisuudeltaan alle 4 mm lajitteesta. Kalliomurskeille määrittäystä ei suoritettu.

4.1.5 pH

pH:n mittausta varten 100 g kuivaa rakeisuudeltaan alle 0,074 mm hienoaainesta punnittiin mitta-astiaan, johon lisättiin 200 ml tislattua vettä. Liuos sekoitettiin huolellisesti. Näytteen annettiin seisoa yön yli ja seuraavana päivänä mitattiin pH liuoksesta Schott:n pH-Meter CG 822 -mittarilla lappapääelektrodia käyttäen. Lopullinen mittausulos saatiin kahden rinnakkaisnäytteen keskiarvona.

Moreenien ja kalliomurskeiden pH määritettiin myös alle 16 mm lajitteesta, jonka oletettiin kuvaavan koko näytteen pH-arvoa. Määrittäminen suoritettiin edellä kuvatulla tavalla. Koska tuloksissa oli hajontaa, mittaus suoritettiin kolmelle rinnakkaisnäytteelle. Lopullinen pH:n arvo saatiin kolmen rinnakkaisnäytteen keskiarvona.

4.1.6 Sähkönjohtavuus

Sähkönjohtavuus mitattiin samasta liuoksesta kuin pH. Mittaus suoritettiin Consort Conductometer K 611 -mittarilla lasielektrodilla. Koska sähkönjohtavuus riippuu voimakkaasti veden lämpötilasta, korjattiin tulokset vastaamaan sähkönjohtavuutta 25 °C:ssa vertailukelpoisten arvojen saamiseksi. Lopullinen sähkönjohtavuuden arvo saatiin kahden (hienoainesnäytteet) tai kolmen (karkearakeiset näytteet) rinnakkaisnäytteen keskiarvona. Ominais-sähkönjohtavuuden yksikkönä käytettiin mS/m.

4.1.7 Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus

Moreenien ja kalliomurskeiden maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus määritettiin parannetulla Proctor-kokeella GLO-85:n / 5/ mukaan. Moreeneille määrittäminen tehtiin 16 mm seulan läpäisseelle kiviainekselle koneellisesti 4" muotissa ja murskeille 32 mm seulan läpäisseelle kiviainekselle käsin 6" muotissa.

Savelle ei suoritettu Proctor-koetta vaan sen maksimikuivatilavuuspaino määritettiin luonnonvesipitoisuudessa sullomalla savi käsin matalaan rengasmaiseen muottiin mahdollisimman tiiviisti.

4.1.8 Plastisuus

Savelle määritettiin plastisuusominaisuuksia kuvaavat kieritys- ja juoksuraja GLO-85:n / 5/ mukaan. Kieritysraja määritettiin kierityskokeella ja juoksuraja koputuskokeella. Plastisuusluku laskettiin GLO-85:n / 5/ mukaan.

4.1.9 Kiintotiheys

Moreenien ja kalliomurskeiden kiintotiheys määritettiin vedessä punnitsemalla Rakentamisen laadunvarmistus -ohjeen / 6/ mukaan ja avopyknometrimenetelmällä PANK-menetelmien (PANK-2107) / 10/ mukaan. Moreeneille vedessä punnitseminen suoritettiin 4...20 mm lajitteelle (näyte n. 500-1000 g) ja avopyknometrimenetelmä 0...20 mm lajitteelle (näyte n. 500 g). Murskeilla vastaavat lajitteet olivat 4...32 mm (näyte n. 500-1000 g) ja 0...32 mm (näyte n. 3500 g). Murskeiden suuren raekoon vuoksi avopyknometrinä käytettiin n. 7 l teräskattilaa ja ilma poistettiin näytteestä keittämällä. Määri-

tykset tehtiin kahdella rinnakkaisnäytteellä. Lopulliset arvot kiintotiheyksille saatiin laskemalla rinnakkaisnäytteiden keskiarvo.

Saven kiintotiheys määritettiin pyknometrimenetelmällä GLO-85:n / 5/ mukaan kahdelle rinnakkaisnäytteelle. Lopullinen arvo kiintotiheydelle saatiin laskemalla rinnakkaisnäytteiden keskiarvo.

4.1.10 Kapillaarisuus

Moreenien ja kalliomurskeiden kapillaarisuus määritettiin Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeiden / 8/ mukaan alle 16 mm lajitteesta. Lopullinen arvo kapillaarisuudelle saatiin kolmen rinnakkaismäärityksen keskiarvona. Saven kapillaarisuutta ei määritetty.

4.1.11 Vedenadsorptioluku

Moreenien ja kalliomurskeiden alle 0,074 mm hienoaineksen vedenadsorptioluku määritettiin Rakentamisen laadunvarmistus -ohjeen / 6/ mukaan kahdelle rinnakkaisnäytteelle. Lopullinen arvo vedenadsorptioluvulle saatiin laskemalla rinnakkaisnäytteiden keskiarvo. Saven vedenadsorptiolukua ei määritetty.

4.1.12 Vedenpidätyskyky

Runkoaineiden vedenpidätyskyky määritettiin painelevylaitteen eli pF-laitteen avulla. Kokeessa aluksi täysin vedellä kyllästetyistä näytteistä poistetaan vettä portaittaisilla paineilla 7,5, 10, 20, 32, 50, 82, 100, 200 ja 500 kPa / 11/. Koe tehtiin 8 mm seulan läpäisevälle lajitteella kahdelle rinnakkaisnäytteelle. Käytetty näytekokoo oli $d \times h = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$. Lopullinen käyrä vedenpidätyskyvylle saatiin laskemalla rinnakkaisnäytteiden keskiarvo.

4.1.13 Hienoaineksen ominaispinta-ala

Hienoaineksen ominaispinta-ala määritettiin GEMINI 2360 typpiadsorptiolaitteella tielaitoksen Geokeskuksen laboratoriossa sekä moreeneille että kalliomurskeille. Määritykset suoritettiin PANK-2401 menetelmän / 10/ mukaan rakeisuudeltaan alle 0,063 mm hienoainekselle. Savelle ei tehty ominaispinta-alan määritystä.

4.1.14 Kuulamylyarvo

Kalliomurskeiden kuulamylyarvo määritettiin tielaitoksen Oulun tiepiirin laboratoriossa. Koe suoritettiin menetelmän PANK-2208 / 10/ mukaan kahdelle

rinnakkaisnäytteelle. Lopullinen kuulamylyarvo saatiin laskemalla rinnakkaisnäytteiden keskiarvo.

4.1.15 Liuskeisuus

Kalliomurskeiden liuskeisuus määritettiin ohjeen PANK-2203 (tuotetestin) / 10/ mukaan tielaitoksen Oulun tiepiirin laboratoriossa. Määritys tehtiin näytteelle, jossa alle 20 mm lajitetta oli n. 5 kg.

4.1.16 Mineraalikoostumus

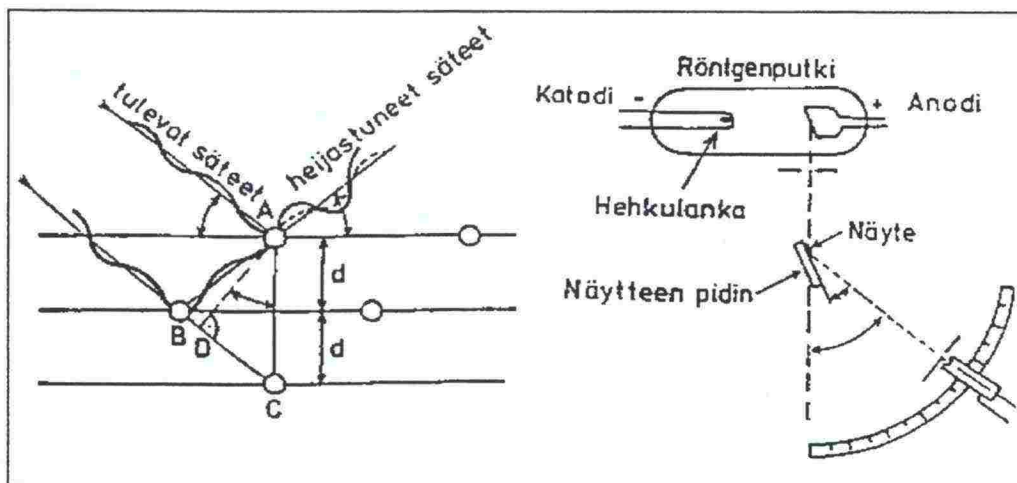
Runkoaineiden mineraalikoostumus tutkittiin Oulun yliopiston elektronioptikan laitoksella Siemens D5000 -diffraktiometrillä. Määritykset tehtiin sekä rakeisuudeltaan alle 0,074 mm hienoaineksesta että karkeammasta # 10...16 mm lajitteesta.

Menetelmä perustuu röntgensäteiden interferenssiin kidehilan sisällä. Kun röntgensäteiden heijastuskulma ja aallonpituus tunnetaan, saadaan kiteen hilamitat Braggin lain avulla / 9/:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

missä n on kokonaisluku
 λ säteen aallonpituus, mm
 d hilatasojen etäisyys, mm
 θ röntgensäteiden tulokulma, °

Mittaustulokset tallentuvat tietokoneelle, jonka avulla voidaan piirtää röntgendiffraktiodiagrammi. Mineraalien tunnistaminen tapahtuu DIFFRACT-AT EVA -grafiikkaohjelmaa käyttäen. Ohjelmaan on tallennettu kullekin mineraalille ominaiset hilamitat. Mitatun diagrammin piikkien paikan ja intensiteetin perusteella voidaan tunnistaa näytteessä olevat diagrammit / 9/. Kuvassa 3 on esitetty röntgendiffraktiomenetelmän periaate.



Kuva 3: Periaatekuva röntgendiffraktiomenetelmästä / 9/.

4.2 Ennakkokokeet

4.2.1 Puristuskoekappaleet

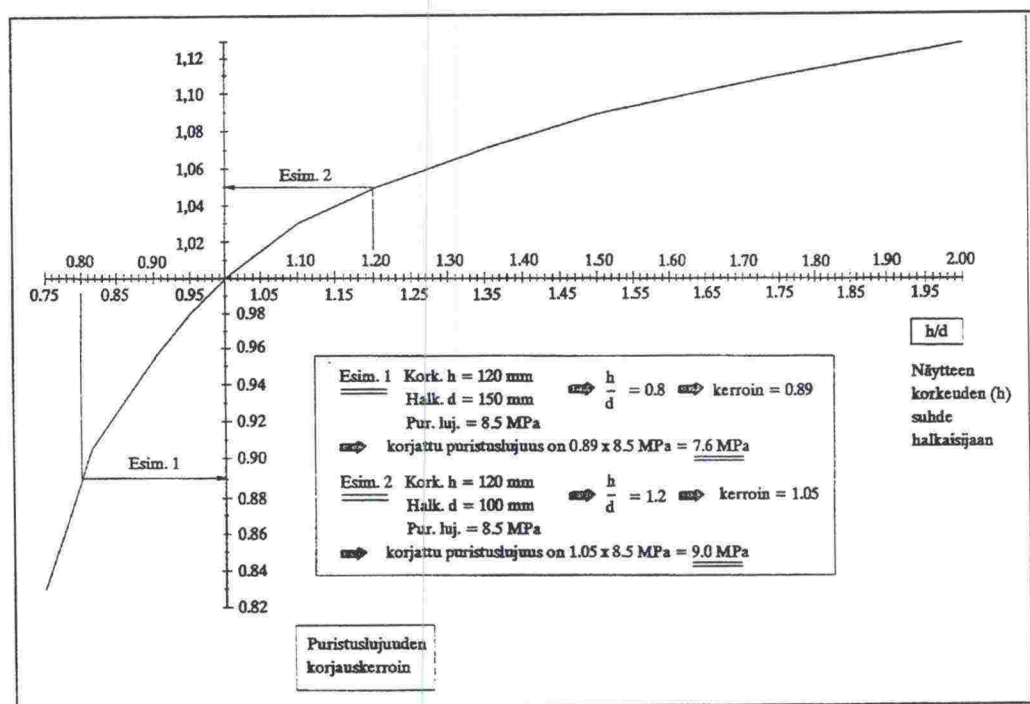
Ennakkokokeiden tarkoituksena oli löytää jatkotutkimuksia varten kullekin materiaalille sellainen sideainepitoisuus, jolla Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaisesti valmistetun 7 vuorokauden ikäisen koekappaleen puristuslujuus olisi 5 MPa. Poikkeuksena oli savi, jolle sementtipitoisuudet jatkotutkimuksia varten valittiin ilman ennakkokeita. Syynä tähän oli se, että savella vaaditun 5 MPa lujuuden saavuttaminen olisi aiempien kokemusten perusteella vaatinut suhteettoman paljon sementtiä muihin tutkimusmateriaaleihin verrattuna, eikä tavoitteen saavuttamista savella pidetty mielekkäänä.

Puristuslujuudet määritettiin Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaisille 7 vrk:n ikäisille koekappaleille eri sementtipitoisuuksilla kahden rinnakkaisnäytteen keskiarvona. Alustavat sementtipitoisuudet määritettiin ohjeen käyrästäoltä runkoaineen rakeisuuden ja maksimikuivatilavuuden avulla. Savelle ei suoritettu ennakkokokeita.

Moreeneilla koekappaleet valmistettiin IC-kiertotiivistimellä 16 mm seulan läpäisevästä kiviaineksesta \varnothing 100 mm muottiin ja murskeilla lajitteesta 0...32 mm \varnothing 150 mm muottiin. Molemmissa tapauksissa koekappaleiden h/d-suhde oli 1. Sementti mitattiin painoprosentteina runkoaineen massasta ja vesi painoprosentteina runkoaine-sementtiseoksen massasta. Koekappaleet tiivistettiin runkoaineen maksimikuivatilavuuspainoon runkoaineen optimivesipitoisuudessa. Osalla kalliomurskeista optimivesipitoisuutta ei saatu määritettyä, jolloin koekappaleiden valmistuksessa käytettävät vesipitoisuudet ja maksimikuivatilavuudet jouduttiin arvioimaan. Yhtenä vesipitoisuuden kriteerinä pidettiin sitä, että tiivistysvaiheessa muotista ei saanut tihkua vetä.

Koekappaleita varten tarvittavat stabilointimassat sekoitettiin porakoneeseen asennetulla sekoittajalla siten, että ensin sekoitettiin kuiva runkoaine ja sementti, jonka jälkeen lisättiin vesi. Sekoitusaika oli kaksi minuuttia. Koekappaleet tiivistettiin puolen tunnin kuluessa massan valmistuksesta.

Koekappaleita säilytettiin Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaisissa säilytysolosuhteissa 7 vuorokautta, jonka jälkeen ne puristettiin kasvattamalla kuormitusta nopeudella 2,5 kN/s. Puristuskokeet suoritettiin Oulun yliopiston rakennetekniikan laboratoriossa. Puristuslujuudet korjattiin tarvittaessa kuvasta 4 saadulla kertoimella, joka riippuu koekappaleen h/d-suhteesta.



Kuva 4: Puristuslujuuden korjauskertoimet sylinterimäisille koekappaleille/ 12/.

Puristuskoeappaleiden valmistukseen käytetyistä massoista otettiin kustakin näytteet, joista määritettiin pH sekä sähkönjohtavuus. Määritykset tehtiin luvuissa 3.2.5 ja 3.2.6 kuvatulla tavalla paitsi, että näyte valmistettiin sekoittamalla 100 g kosteaa massaa 100 ml:aan tislattua vettä.

4.2.2 Massojen valinta jäädytys-sulatuskokeisiin

Moreeneilla jatkotutkimuksiin valittiin sellaiset ennakkokokeiden mukaiset massat, joiden 7 vrk:n puristuslujuus oli 5 MPa. Lisäksi jäädytys-sulatuskokeisiin valittiin myös massat, joiden sementtipitoisuus oli $\pm 2 \%$ 5 MPa lujuuden antavasta sementtipitoisuudesta. Sementtipitoisuuden alarajana oli 1,5 %.

Kalliomurskeilla massojen valinta em. tavalla todettiin tuloksettomaksi. Jatkokutkimuksissa päätettiin sen sijaan käyttää kaikilla murskeilla samoja sementtipitoisuuksia ja samaa vesipitoisuutta. Sementtipitoisuudet määritettiin painoprosentteina runkoaineen massasta ja vesipitoisuus painoprosentteina runkoainesementtiseoksen massasta kuten moreeneillakin. Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaan maabetonin vesi-sementtisuhteen tulee olla 0,7-1,0, joten sementti- ja vesipitoisuudet valittiin siten, että pienimmillään vesi-sementtisuhte oli n. 0,7.

Saven sementtipitoisuudet valittiin kokemuseräisesti. Muista runkoaineista poiketen savi stabiloitiin luonnonkosteana ja sementin määrä punnittiin painoprosentteina saven märkäpainosta.

4.3 Jäädytys-sulatuskokeet

4.3.1 Massojen tilavuuspaino

Kaikille tutkittaville runkoaineille savea lukuunottamatta määritettiin valituista kolmesta sideainepitoisuudesta keskimmaisella valmistetun massan parannettu proctor -tiheys kiviaineksen optimivesipitoisuudessa. Saksalaisten ohjeiden / 13/ ja / 14/ mukaan stabilointimassan maksimitiheys tulisi määrittää normaalilla Proctor-kokeella, mutta tässä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään parannettua Proctor-koetta, joka on Suomessa yleisesti käytössä oleva maksimitiheyden määritysmenetelmä. Myöskään massan optimivesipitoisuutta ei määritetty erikseen vaan se oletettiin samaksi kuin runkoainee lla.

Moreeneilla tiheyden määrittäminen suoritettiin ohjeen / 13/ mukaisesti maasegmenttiseokselle, jossa runkoaineen yli 20 mm rakeet korvattiin vastaavan painoisella määrällä lajitetta 4...20 mm. Näin materiaali saatiin paremmin vastaamaan tutkittavaa maksimiraekooltaan 32 mm materiaalia. Kiviaineksen optimivesipitoisuutta korjattiin vastaavasti kivisyyskorjauksella. Moreenien kivisyydet (yli 16 mm rakeiden osuus koko materiaalista) olivat niin pienet, että niillä ei ollut vaikutusta moreenien maksimikuivatilavuuspainoon, joten Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaista sementtipitoisuuden korjausta ei tarvinnut tehdä. Kalliomurskemassojen runkoaineen maksimiraekoko oli 32 mm, kuten ennakkokokeissakin. Jatkossa tiheyden oletettiin olevan sama kaikilla kolmella sementtipitoisuudella valmistetulla massa lla.

Proctor-koetta varten massa sekoitettiin kuten ennakkokokeissa, suojattiin haihtumiselta ja annettiin tasaantua ohjeiden / 13/ ja / 14/ mukaisesti 1 h ± 15 min ennen kokeen suorittamista. Juuri ennen tiivistystä massa sekoitettiin vielä käsin.

4.3.2 Koemenetelmä

Jäädytys-sulatuskokeet suoritettiin pääosin saksalaisten ohjeiden TP HGT-StB 86 / 14/ ja TP BF-StB Teil B 11.1 / 13/ mukaan. Ohjeista ensimmäinen on tarkoitettu tietyt laatuvaatimukset täyttävän kantavan kerroksen maabeetonin testaamiseen, kun taas jälkimmäisessä ei testattavien materiaalien laadulle ole asetettu vaatimuksia. Koemenetelmä on molemmissa ohjeissa periaatteessa sama, eroa on vain runkoaineiden valmistelussa. Tässä tutkimuksessa stabiloitu savi sekä moreenit testattiin ohjeen / 13/ ja kalliomurskeet ohjeen / 14/ mukaisesti.

Ohjeiden mukaisesti hydraulisesti stabiloitujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyyttä tutkittiin syklisellä jäädytys-sulatuskokeella. Tutkimuksessa kaikkia koekappaleita, jotka altistettiin jäädytys-sulatussykleille, rasi-tettiin samojen periaatteiden mukaisesti. Näistä kappaleista tutkittiin syklisen jäädytys-sulatusrasituksen vaikutusta hydraulisesti stabiloitujen materiaalien mekaanisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin sekä tilasuureisiin. Vertailuarvot määritettiin vastaavalla tavalla valmistetuista 28 vuorokautta lujittuneista koekappaleista, joita ei altistettu sykliselle jäädytys-sulatusrasitukselle. Seuraavassa on esitetty jäädytys-sulatuskokeen periaatteet.

Ohjeiden / 13/ ja / 14/ mukaan koekappaleet tulisi tiivistää normaalilla Proctor-kokeella määritettyyn maksimitiiviyteen massan optimikosteudessa. Tässä tutkimuksessa käytetyt koekappaleet tiivistettiin ohjeista poiketen ja suomalaista ohjetta / 12/ paremmin vastaavasti tiiviysasteeseen 95 % massan parannetulla Proctor-kokeella runkoaineen optimikosteudessa määritetystä maksimitilavuuspainosta (kts. kappale 3.4.1).

Ohjeen / 13/ mukaisesti moreenien yli 20 mm rakeet korvattiin vastaavan painoisella määrällä lajitetta 4...20 mm. Näin saatiin materiaali paremmin vastaamaan runkoaineen alkuperäistä rakeisuutta. Massa valmistettiin kuten kappaleessa 3.4.1 ja tiivistettiin kerroksittain kutakin koetta varten tarkoituksenomaiseen muottiin. Aina ennen seuraavan kerroksen lisäystä alapuolisen kerroksen pinta karhutettiin kerrosten välisen tartunnan parantamiseksi.

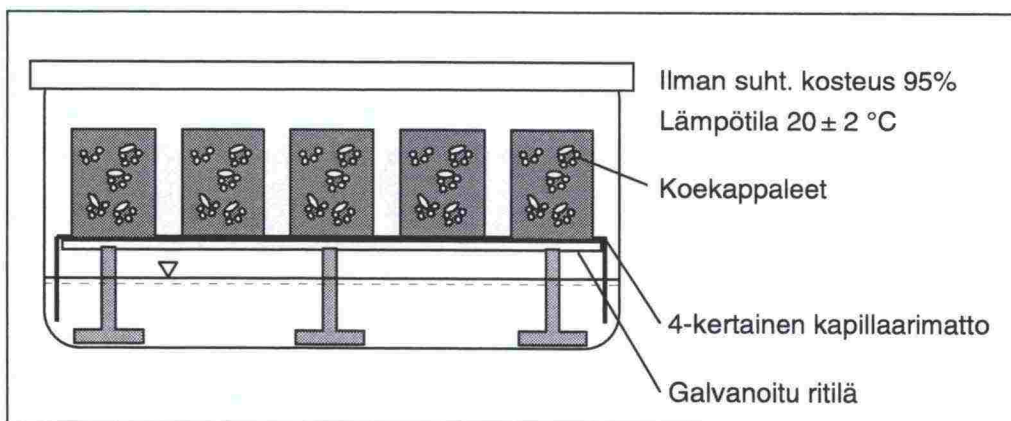
Ohjeen / 14/ mukaan > 32 mm lajitetta saa tutkittavassa kiviaineksessa olla enintään 10 %. Mikäli lajitetta on enemmän on se poistettava seulomalla ja koe suoritettava < 32 mm lajitteella. Tässä tutkimuksessa kalliomurskeiden maksimiraekoko oli suomalaisen käytäntöön sopiva 32 mm. Massat tiivistettiin kuten edellä.

Savi- ja moreenikappaleiden muotit purettiin heti valmistuksen jälkeen. Kalliomurskekappaleiden annettiin lujittua muutaman päivän ajan ennen muotien purkamista. Lujittumisaika ennen jäädytys-sulatuskoetta oli 28 vuorokautta. Lujittumisen ajan koekappaleita säilytettiin ritilällä kannellisissa laatikoissa, joiden pohjalla oli ohut kerros vettä riittävän ilmankosteuden

(suhteellinen ilmankosteus yli 95 %) varmistamiseksi. Säilytyksen aikana koekappaleet eivät olleet kosketuksissa veden kanssa.

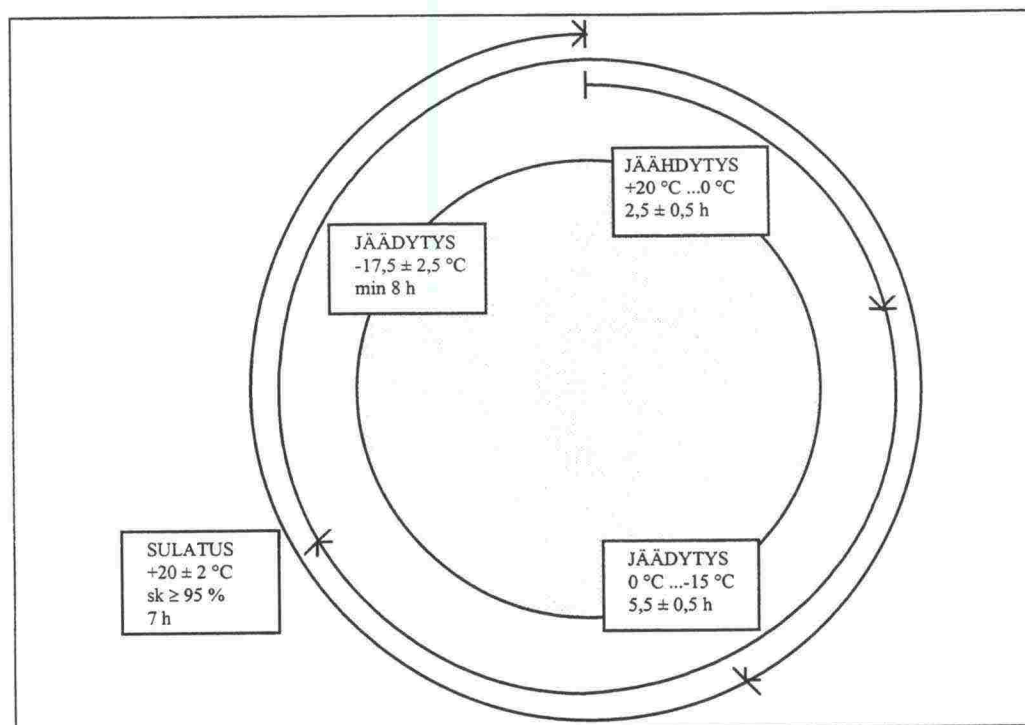
Jäädytys-sulatuskoe aloitettiin, kun koekappaleet olivat lujittuneet 28 vuorokautta. Ensimmäisessä vaiheessa koekappaleiden ja ritilän väliin laatikkoon asetettiin 2 mm paksu kapillaarihuopa, jonka reunat ulottuivat veteen (Kuva 5). Kappaleet asetettiin 4 tunniksi huovalle, jossa ne saivat kapillaarisesti imeä vettä. Säilytyslaatikkoa pidettiin huoneenlämmössä ja sen sisällä suhteellinen ilmankosteus oli yli 95 %. Ohjeiden / 13/ ja / 14/ mukaan koekappaleiden lämpötila jäädytysjakson aikana tulisi ensimmäisen $2,5 \pm 0,5$ tunnin aikana laskea 20 °C :sta 0 °C :en, jonka jälkeen $5,5 \pm 0,5$ tunnin aikana 0 °C :sta -15 °C :en. Jäähdytysvaiheen jälkeen koekappaleiden lämpötilan tulisi olla vähintään 8 tunnin ajan eli jakson loppuun asti $-17,5 \pm 2,5\text{ °C}$. Tässä tutkimuksessa jäädytys järjestettiin edellisestä poikkeavasti siten, että koekappaleet asetettiin ensimmäisen vaiheen jälkeen suoraan $-17,5 \pm 2,5\text{ °C}$ lämpötilaan.

Jäädytysjakson pituus oli 17 tuntia, jonka jälkeen kappaleet asetettiin sulamaan ensimmäisen vaiheen kaltaisiin olosuhteisiin (Kuva 5). Ennen huovalle asettamista kappaleita käännettiin 180 astetta, jolloin kappaleiden kapillaarihuopaa vasten oleva pääty vaihtui. Sulatusjakson pituus oli 7 tuntia.



Kuva 5: Näytteiden säilytys ennen ensimmäistä jäädytystä sekä jäädytys-sulatuskokeen sulatusjakson aikana.

Sulatusjakson jälkeen kappaleet siirrettiin taas pakastimeen $-17,5\text{ °C}$ lämpötilaan 17 tunnin ajaksi. Edellä kuvatun kaltaisia jäädytys-sulatussyklejä suoritettiin yhteensä 12. Kappaleiden kääntäminen suoritettiin jokaisen jäädytysjakson jälkeen. Viikonlopun tms. aikana kappaleita säilytettiin jäätymisessä tilassa. Ohjeiden / 13/ ja / 14/ mukainen jäädytys-sulatussykli on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: Saksalaisen ohjeen mukainen jäädytys-sulatussykli.

4.3.3 Pituuden muutos

Saksalaisissa ohjeissa / 13/ ja / 14/ stabiloidun materiaalin jäätymis-sulamiskestävyyden kriteerinä on koekappaleen pituuden laajeneminen jäädytys-sulatuskokeen aikana. Ohjeiden mukaan koekappaleiden pituus mitataan jäädytysjakson jälkeen koekappaleen ollessa jäätyneessä tilassa. Jotta materiaali läpäisisi kokeen tulee 1. ja 12. syklin välisen pituuden muutoksen suhteessa koekappaleen pituuteen ennen kokeen alkua olla alle 1 %.

Koetta varten moreenikoekappaleet valmistettiin ohjeen / 13/ mukaiseen halkaistavaan muottiin, jonka halkaisija oli 100 mm ja korkeus 120 mm. H/d-suhde oli 1,2. Muottina käytettiin kuvan 7 mukaista muottia (pienempi muotti). Muotin pohjalevyssä on kolme reikää, joihin työnnettäviin uppokantaruuveihin koekappaleen sisälle upotettavat messinkiankkurit kiinnitetään. Muottiin kuuluu myös päällyslevy, jonka keskelle on porattu reikä ankkurin kiinnittämistä varten, ja kaulus, jota käytetään apuna tiivistysvaiheessa (ei kuvassa). Ennen koekappaleiden valmistusta muotit öljyttiin tarttumisen estämiseksi.



Kuva 7: Pituuden muutos -koekappaleiden valmistuksessa käytetyt halkaistavat muotit.

Testi suoritettiin valituilla kolmella sideainepitoisuudella valmistetuille koekappaleille kolmella rinnakkaisnäytteellä. Massojen valmistus suoritettiin kuten kappaleessa 3.4.1. Koekappaletta varten tarvittava massa laskettiin etukäteen ja punnittiin kolmeen osaan gramman tarkkuudella. Moreeneilla tiivistys suoritettiin koneellisesti kolmessa kerroksessa 2,5 kg:n Proctor-vasaralla (normaali Proctor -menetelmä). Tiiviysasteeseen 95 % pääsemiseksi tarvittavien iskujen lukumäärä kerrosta kohden selvitettiin etukäteen. Ennen seuraavan kerroksen lisäämistä edellisen kerroksen pinta karheutettiin n. 5 mm syvyydeltä kerrosrajojen välttämiseksi. Viimeisen kerroksen päälle asetettiin päällyslevy, jonka päältä kerros tiivistettiin. Samalla koekappaleen yläpintaan upotettava ankkuri kiinnittyi paikalleen.

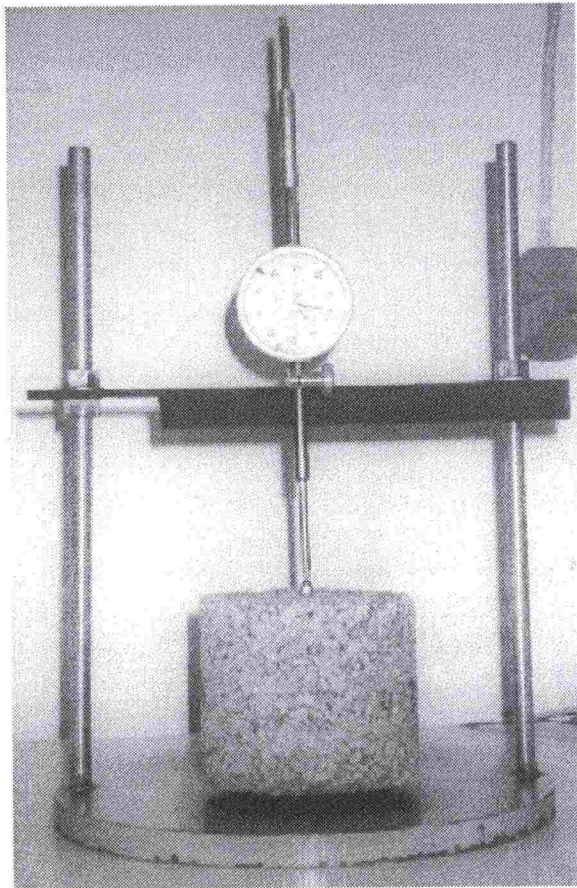
Kalliomurskeista valmistettiin koekappaleet ohjeen / 14/ mukaiseen muottiin, jonka halkaisija oli 150 mm ja korkeus 125 mm (kuvan 7 isompi muotti). H/d-suhde oli 0,83. Massan valmistus ja koekappaleiden tiivistys suoritettiin kuten edellä paitsi, että tiivistys suoritettiin käsin 4,5 kg:n Proctor-vasaralla.

Savikoekappaleet valmistettiin kuten moreenikappaleet paitsi, että tiivistys suoritettiin käsin. Massat valmistettiin lisäämällä sementti luonnonkosteaan saveen. Sekoitus suoritettiin porakoneeseen kiinnitetyllä sekoittimella.

Pohja- ja päällyslevyjen annettiin olla paikoillaan kunnes ankkurit olivat kiinnittyneet riittävän lujasti. Ennen levyjen poistamista kierrettiin levyjen läpi menevät ruuvit irti. Kappaleiden kokonaislujittumisaika oli 28 vrk. Lujittumisen ajan koekappaleita säilytettiin rutilällä kannellisissa laatikoissa, joiden pohjalla oli matala kerros vettä riittävän ilmankosteuden varmistamiseksi. Säilytyksen aikana koekappaleet eivät olleet kosketuksissa veden kanssa.

Koekappaleet otettiin säilytyksestä 28 vrk:n ikäisinä ja niiden pituus mitattiin työntötulkilla 0,1 mm tarkkuudella kolmesta kohtaa noin 120 asteen välein.

Koekappaleen pituus laskettiin mittausten keskiarvona. Mittanastat valmistettiin kiertämällä hattumutterit \varnothing 5 mm kierretankoihin, pitävyys varmistettiin liimalla. Näin valmistetut mittanastat kierrettiin koekappaleiden molemmissa päissä oleviin ankkureihin siten, että hattumutterit tulivat tiiviisti kiinni ankkurin päässä olevaan tiivistysrenkaaseen. Koekappaleet nostettiin seisomaan alapinnan kolmen nastan päälle ja asetettiin mittalaitteeseen, johon oli kiinnitetty mittakello (Kuva 8). Kunkin koekappaleen nollalukema mitattiin mittalaitteessa 0,01 mm tarkkuudella yläpinnan nastan yläreunasta. Ensimmäisen mittauksen jälkeen koekappaletta käännettiin 120 astetta ja mittaus uusittiin. Kierto ja mittaus toistettiin vielä kerran. Tämän jälkeen koekappale otettiin pois mittalaitteesta ja asetettiin taas takaisin. Mittaus kääntämisineen suoritettiin kuten edellä. Mittakellon lukema laskettiin kuuden mittauksen keskiarvona. Mittauksen jälkeen koekappaleet punnittiin.



Kuva 8: Pituuden muutoksen mittauksessa käytetty mittalaitteisto.

Koekappaleille suoritettiin kappaleen 3.4.2 mukainen syklinen jäädytys-sulatuskoe. Ennen jäädytys-sulatuskokeen ensimmäistä vaihetta leikattiin kapillaarihuopaan aukot mittanastojen kohdalle. Koekappaleet asetettiin huovalle siten, että mittanastat asettuivat huovan aukkojen kohdalle, jotta koekappaleiden päädyt saatiin asettumaan tiiviisti huopaa vasten. Jokaisen jäädytysjakson jälkeen koekappaleet punnittiin ja niiden pituus mitattiin mittakellolla kuten edellä.

Kokeen jälkeen laskettiin 1. ja 12. jäädytyksen välisenä aikana tapahtunut suhteellinen pituuden muutos Δl jakamalla 1. ja 12. jäädytysjakson välisenä aikana tapahtunut pituuden muutos ennen kokeen alkua mitatulla koekappaleen pituudella. Tulos ilmoitettiin 0,1 % tarkkuudella. Ohjeiden / 13/ ja / 14/ mukaan suhteellinen pituuden muutos Δl saa olla enintään 1 % materiaalin jäätymis-sulamiskestävyyyden varmistamiseksi. Vastaavalla tavalla laskettiin suhteellinen pituuden muutos myös jäädytysjaksojen 1-11 jälkeen. Lisäksi laskettiin koekappaleiden suhteellinen pituuden muutos ensimmäisen jäädytyksen jälkeen jakamalla 1. jäädytysjakson jälkeen ja ennen kokeen alkua mitattujen pituuksien erotus ennen kokeen alkua mitatulla koekappaleen pituudella.

4.3.4 Puristuslujuus

Yksiaksiaalinen puristuslujuus määritettiin jokaisella sideainepitoisuudella kahdesta pituuden muutoksen mittaukseen käytetystä koekappaleesta jäädytys-sulatuskokeen jälkeen. 12. jäädytyksen jälkeisten mittausten jälkeen koekappaleet asetettiin sulamaan jäädytys-sulatuskokeessa käytettyihin laatikoihin, joista huopa oli poistettu. Koekappaleiden ei siis enää annettu imeä vettä. Puristuskoe suoritettiin seuraavana päivänä sulaneille koekappaleille kuten ennakkokokeissa. Poikkeuksena olivat savinäytteet, joiden puristus suoritettiin siirtymäperusteisesti nopeudella 1 mm/min. Vertailupuristuslujuus määritettiin 28 vrk:n ikäisistä vastaavalla tavalla, mutta ilman ankkureita valmistetuista koekappaleista, joille ei suoritettu pakkaskoetta. Lopulliset puristuslujuudet saatiin kahden koekappaleen puristuslujuuksien keskiarvona.

4.3.5 Staattinen kimmomoduuli

Stabiloitujen tutkimusmateriaalien staattinen kimmomoduuli laskettiin koekappaleiden puristuslujuuden ja tiheyden perusteella Betoninormien / 2/ mukaan (Kaava 2). Kimmomoduulit laskettiin 28 vuorokauden ikäisille sekä jäädytys-sulatussyklit läpikäyneille näytteille kaikilla kolmella sementtipitoisuudella. Lopulliset E-moduulit saatiin kahden koekappaleen moduulien keskiarvona.

$$E_c = 5000 k \sqrt{K} \quad (2)$$

missä E_c on kimmomoduuli MPa

$$k = \frac{\rho_c}{2400} \leq 1,0$$

ρ_c tiheys kg/m³

K betonin nimellislujuus MN/m²

4.3.6 Dynaaminen kimmomoduuli

Dynaaminen kimmomoduuli määritettiin kolmiaksisiaalilaitteistolla. Laitteistolla voidaan simuloida pystysuuntaista dynaamista kuormitusta eri ympäristöolosuhteissa. Saven ja moreenien dynaaminen kimmomoduuli määritettiin kahdesta keskimmaisella sideainepitoisuudella valmistetusta $d \times h = 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ sylinterimäisestä koekappaleesta 28 vrk:n ikäisenä ja jäädytys-sulatuskokeen jälkeen. Jäädytys-sulatuskoetta varten valmistettavien koekappaleiden muottina käytettiin muovisesta $\varnothing 102 \text{ mm}$ viemäriputkesta sahattua 200 mm korkeaa kappaletta. Putken halkaisijaa pienennettiin asettamalla sisäpinnalle kumimatto, jolloin sisähalkaisijaksi saatiin 100 mm . Massa tiivistettiin muottiin kahdeksassa kerroksessa 95 %:n tiiviYTEEN. Valmistuksen jälkeen koekappaleiden molemmat päät tasattiin ja suojattiin suodatin-kankaalla. Valmistusta koekappaleita säilytettiin muotissa lujittumisen ja jäädytys-sulatuskokeen ajan, jotta sivusuuntaista laajenemista ei päässyt tapahtumaan.

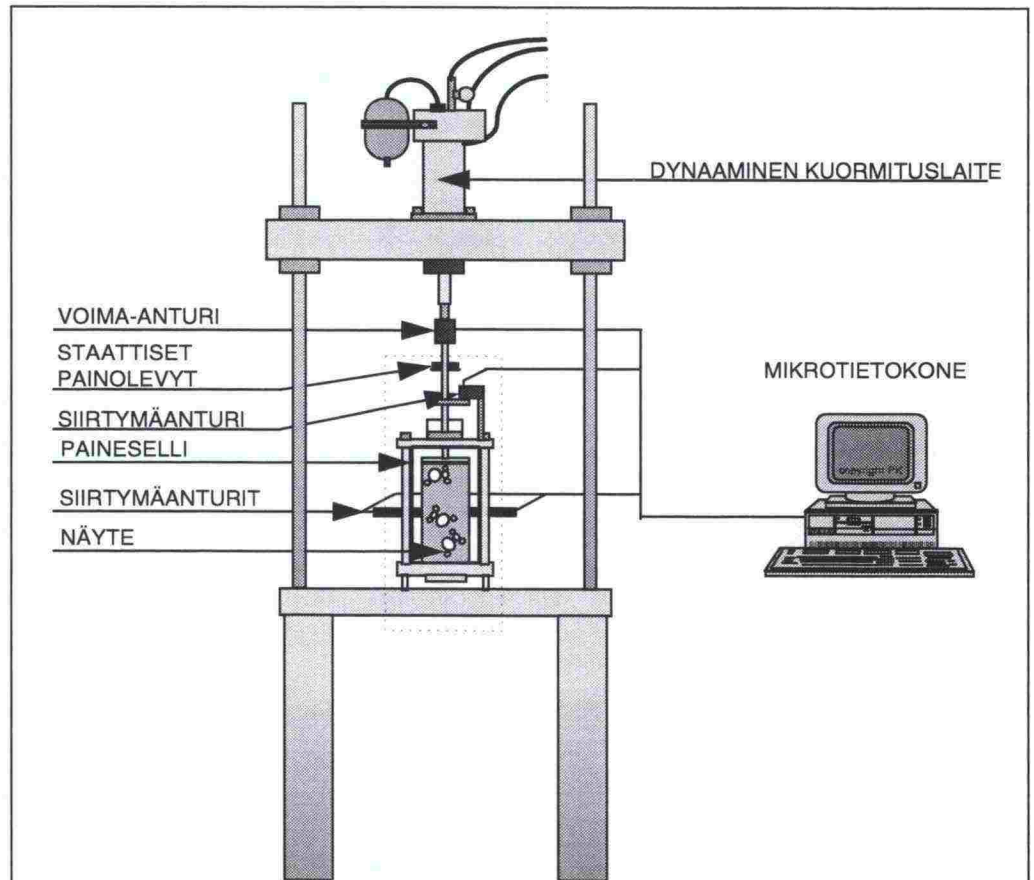
Savella ja moreeneilla vertailunäytteinä käytetyt 28 vuorokauden ikäiset koekappaleet valmistettiin kuten jäädytys-sulatuskoekappaleet, mutta tätä tarkoitusta varten rakennettuun $d \times h = 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ muottiin, josta valmiit koekappaleet poistettiin tunkkaamalla.

Stabiloitujen kalliomurskeiden dynaaminen kimmomoduuli määritettiin keskimmaisella sideainepitoisuudella $d \times h = 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ sylinterimäisestä koekappaleesta 28 vrk:n ikäisenä ja jäädytys-sulatuskokeen jälkeen. Määritykset tehtiin yhdellä näytteellä. Yhteen koekappaleeseen päädyttiin käytettävissä olevien materiaalien vähyiden vuoksi. Koekappaleet valmistettiin tiivistämällä massa halkaistavaan muottiin kahdeksassa kerroksessa 95 % tiiviysasteeseen. Koekappaleiden annettiin lujittua muutama päivä ennen muotin purkamista.

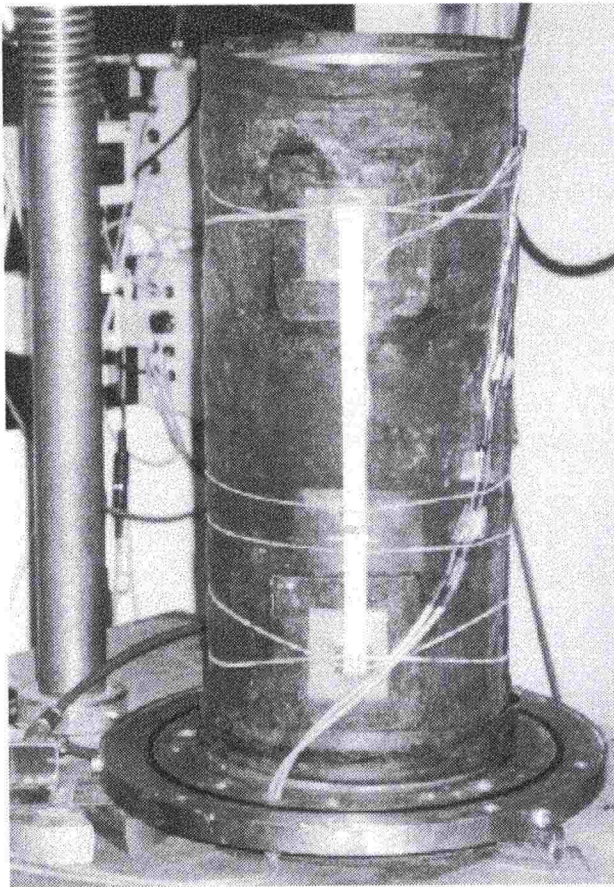
Säilytysolosuhteet olivat lujittumisjakson ja jäädytys-sulatuskokeen aikana kappaleen 3.4.1 mukaiset. Jäädytys-sulatuskokeen jälkeen koekappaleiden annettiin sulaa kuten puristuskoekappaleiden (kappale 3.4.4). Ennen koes-tamista kappaleet mitattiin ja punnittiin. Päät tasattiin tarvittaessa pikatasoitella.

Kokeessa käytettiin puolisinimuotoista kuormituspulssia, jonka taajuus oli 2 Hz. Pulssin kesto oli 0,05 s ja lepoaika 0,45 s. Kokeet tehtiin pääosin viidellä eri sellipaineella. Dynaaminen kuormitus suoritettiin kasvattamalla kuormitusta portaittain välillä 20-500 kPa. Kuormitusportaat valittiin siten, että näytteeseen syntyvät palautumattomat muodonmuutokset jäisivät mahdollisimman pieniksi. Kokeen aikana mitattiin näytteen vaaka- ja pystysiirtymiä sekä sivupainetta (sellipainetta) ja dynaamista pystykuormitusta (Kuva 9). Vaakasiirtymä mitattiin pienemmillä ($100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$) näytteillä LVDT-anturilla näytteen keskimmaisesta kolmanneksesta. Suuremmilla kalliomurskenäytteillä ($200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$) vaakasiirtymää ei mitattu. Pystysiirty-

mä mitattiin pienemmillä näytteillä sellin ulkopuolelta kuormitusmäntään kiinnitetyllä LVDT-anturilla. Isommilla näytteillä pystysiirtymän mittauksessa käytettiin sekä sellin ulkopuolista mitta-anturia että näytteen vastakkaisille sivuille magneetilla kiinnitettyjä siirtymäantureita (Kuva 10), jotka havaittiin edellistä tarkemmaksi mittaussuunnitelmäksi. Aksiaalinen kuormitus mitattiin kuormitusmäntään kiinnitetyllä voima-anturilla. Huokospaine mitattiin näytteen alapinnasta kalvoperiaatteella toimivalla huokospaineanturilla.



Kuva 9: Mittausjärjestely dynaamisessa kolmiaksaalikokeessa.



Kuva 10: Kalliomurskenäytteiden pystysiirtymän mittausjärjestely (mittaus näytteen vastakkaisilta sivuilta) dynaamisessa kolmiaksaalikokeessa.

Kokeen ohjaamiseen käytettiin DasyLab mittausohjelmaa. Kokeen aikana tallennetut mittaustulokset käsiteltiin Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa tehdyillä tietokoneohjelmilla.

Kokeen tuloksena saatava dynaaminen kimmomoduuli (resilient modulus) laskettiin yhtälön (3) avulla.

$$Mr = \frac{\Delta q}{\Delta \varepsilon} \quad (3)$$

missä M_r on dynaaminen kimmomoduuli (MPa)
 Δq deviatorisen jännityksen vaihteluväli (kPa)
 $\Delta \varepsilon$ palautuva suhteellinen muodonmuutos

Dynaamisen kimmomoduulin riippuvuutta jännitystilasta kuvataan usein seuraavalla funktiolla / 3/:

$$M_r = K1\theta_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K2} \quad (4)$$

missä M_r on dynaaminen kimmomoduuli (MPa)
 θ pääjännitysten summa ($3\sigma_3 + \Delta q$) (kPa)
 θ_0 vertailujännitys (100 kPa)
 $K1, K2$ ovat materiaaliparametreja

Dynaamisen kolmiaksiaalikokeen tuloksista laskettiin funktion 4 materiaali-parametrit $K1$ ja $K2$ epälineaarisen regressioanalyysin avulla.

4.3.7 Halkaisuvetolujuus

Halkaisukoe suoritettiin kaikilla materiaaleilla keskimmaisella sideainepitoisuudella CEN-normiluonnoksen / 4/ mukaisesti. Tiiviysaste oli 95 %. Koe suoritettiin sekä 28 vrk:n ikäisille että jäädytys-sulatuskokeen läpikäyneille koekappaleille. Lopullinen halkaisuvetolujuus saatiin kahden koekappaleen lujuuksien keskiarvona.

Moreeneilla halkaisukoetta varten tarvittavat koekappaleet sahattiin timanttisahalla dynaamisella kolmiaksiaalilaitteistolla koestetuista kappaleista siten, että yhdestä dynaamisen kokeen koekappaleesta saatiin kaksi halkaisijaltaan ja korkeudeltaan noin 100 mm koekappaletta halkaisuvetokokeeseen. Tällä menettelyllä ei katsottu olevan vaikutusta halkaisuvetokokeen tuloksiin. Kokeessa puristusvoima jaettiin tasaisesti asettamalla koekappaleen molemmille kyljille 10 x 4 mm (leveys x paksuus) kovalevysuikaleet, joiden pituus oli vähintään koekappaleen pituus. Koekappale kohdistettiin siten, että kuormitus osui keskelle kappaletta. Kuormitusnopeus oli 25 N/s.

Stabiloidun saven halkaisuvetolujuuskoe suoritettiin kuten moreeneillakin, mutta kuormitusnopeus oli 0,024 mm/min, jolloin puristuskokeen ja halkaisuvetokokeen kuormitusnopeuksien suhde oli moreeni- ja savinäytteillä sama.

Kalliomurskeilla halkaisukoe suoritettiin keskimmaisella sementtipitoisuudella Ø150 mm halkaistavaan muottiin kolmessa kerroksessa tiiviysasteeseen 95 % tiivistetyille koekappaleille, joiden korkeus oli 125 mm. Koe suoritettiin pääosin samalla tavalla kuin moreenikappaleillekin. Kuormitusnopeus oli 200 N/s. Kuormituksen jakamiseen käytettiin 15 x 4 mm kovalevysuikaleita, joiden pituus oli vähintään koekappaleen pituus.

4.3.8 Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus määritettiin yksisondimenetelmällä kullekin materiaalille keskimmaisella sideainepitoisuudella valmistetusta koekappaleesta, jonka tiiviysaste oli 95 %. Lämmönjohtosondi asetettiin tiivistyksen yhteydessä koekappaleen keskelle pystysuoraan.

Koekappaleiden sulan tilan (+22 °C) lämmönjohtavuudet määritettiin 1, 7, 14, 21 ja 28 vuorokauden kuluttua valmistuksesta. Jäädytys-sulatuskokeen aikana määritettiin jäätyneen tilan (-17,5 °C) lämmönjohtavuudet aina jäädytysjakson lopussa.

Mittauslaitteistoon kuului vakiovirtageneraattori, tarkkuuslämpömittari, mikrotietokone tiedonkeruu- ja käsittely-yksikkönä sekä haponkestävästä teräksestä valmistettu sondi.

Sondin sisällä olevaa vastuslankaa lämmitettiin siten, että lämmönnousu 15 minuutin aikana oli $2 \pm 0,5$ °C. Lämmönnousu mitattiin sondin keskipisteestä tarkkuuslämpömittarilla. Tiedot tallennettiin viiden sekunnin välein. Koetta ohjattiin mikrotietokoneeseen tehdyn ohjelman avulla.

Sondit kalibroitiin kvartsihiekillä ja vedellä, johon oli lisätty Agar-hyytelöintiainetta konvektion estämiseksi. Tulosten perusteella laskettiin kullekin sondille kalibrointisuorat.

Lämmönjohtavuuden määrittäminen perustuu sondin keskipisteessä mitattavan lämmönnousun havaitsemiseen ajan suhteen. Lämmönnousu ja ajan logaritmi muodostavat suoran, jonka kulmakertoimen lämmönjohtavuus määrää kaavan (5) mukaisesti:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)}(\ln t_2 - \ln t_1) \quad (5)$$

missä λ on lämmönjohtavuus (W/Km)
 q lämmitysteho sondin pituusyksikköä kohti (W/m)
 T lämpötila (°C)
 t aika (s)

4.3.9 Vesipitoisuus

Vesipitoisuuden kehitystä lujittumisjakson sekä jäädytys-sulatuskokeen aikana seurattiin jokaisella materiaalilla. Vesipitoisuus painoprosentteina määritettiin pituuden muutos -koekappaleista kaikilla kolmella sideainepitoisuudella 28 vrk:n iässä ennen jäädytys-sulatuskoetta sekä kokeen jälkeen kuivaamalla koekappaleet vakiopainoon. Vesipitoisuuden määrittämisen jälkeen kuivat koekappaleet kyllästettiin huoneenlämpöisessä vedessä ja määritettiin kyllästysvesipitoisuus. Määrittäminen tehtiin yhdellä näytteellä kutakin sideainepitoisuutta kohti.

Tilavuusvesipitoisuus määritettiin kaapelitutkalla. Keskimmaisella sideainepitoisuudella valmistettiin koekappaleet, joiden sisään tiivistyksen yhteydessä upotettiin TDR-sondi (Time Domain Reflectometer). Koekappale oli sama, josta mitattiin myös lämmönjohtavuutta. Kaapelitutkalla määritetään näyt-

teen dielektrisyysarvo, joka vedellä on selvästi suurempi kuin kiviaineksella. Materiaalin tilavuusvesipitoisuus saadaan dielektrisyysarvosta laajaan mittausaineistoon perustuvan sovitetun käyrän avulla / 7/.

Dielektrisyysarvo määritettiin, kun koekappaleen valmistuksesta oli kulunut 1, 7, 14, 21, 28 vuorokautta. Jäädytys-sulatuskokeen aikana dielektrisyysarvo määritettiin aina ennen jäädytysjakson alkua sulasta kappaleesta. Jäädytys-sulatuskokeen jälkeen kappaleiden annettiin sulaa 1 vrk sulatuslaatikossa, jonka jälkeen koekappaleista määritettiin dielektrisyysarvo. Mittauksen jälkeen koekappaleet kuivattiin vakiopainoon 60 °C:ssa ja mitattiin kuivan kappaleen dielektrisyys. Lopuksi kuivat kappaleet kyllästettiin huoneenlämpöisessä vedessä ja mitattiin kyllästyneen tilan dielektrisyysarvot.

4.3.10 Huokoisuus

Stabilointimassojen huokostilavuuden muutos jäädytys-sulatuskokeen aikana määritettiin kullakin materiaalilla kaikilla kolmella sideainepitoisuudella vesipitoisuuden määrittämiseen käytetyistä koekappaleista. Huokoisuuden määrittämistä varten kuivatut ja punnitut koekappaleet upotettiin huoneenlämpöiseen veteen kyllästymään. Kyllästysasteen kasvua arvioitiin seuraamalla kappaleiden painonnousua. Kun koekappaleiden arvioitiin olevan kyllästyneitä, ne nostettiin pois vedestä, pintakuivattiin ja punnittiin. Välittömästi tämän jälkeen koekappaleet punnittiin vielä vedessä. Huokoisuus laskettiin kaavan (6) mukaisesti / 6/:

$$n = 100 \cdot \frac{m_{sat}^i - m_d}{m_{sat}^i - m_{sat}^w} \quad (6)$$

missä n on huokoisuus (%)
 m_d kuivan näytteen massa (g)
 m_{sat}^i kyllästetty näytteen massa ilmassa (g)
 m_{sat}^w kyllästetyn näytteen massa vedessä (g).

4.3.11 Vedenläpäisevyys

Stabiloitujen moreenien ja saven vedenläpäisevyyttä tutkittiin 28 vrk:n ikäisistä ja jäädytys-sulatuskokeen läpikäyneistä kappaleista. Koekappaleena käytettiin dynaamisen kimmomoduulin määrittämiseen käytettyä koekappaleita, joka sahattiin timanttiterällä kahdeksi halkaisijaltaan ja korkeudeltaan noin 100 mm kappaleeksi. Vedenläpäisykoe suoritettiin vakiopainekokeena joustavaseinäisessä sellissä Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeiden / 8/ mukaan. Materiaalin lopullinen vedenläpäisevyys saatiin kahden rinnakkaiskappaleen vedenläpäisevyyksien keskiarvona.

5 TUTKIMUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

5.1 Runkoaineet

5.1.1 Raekokojakauma

Tutkittavien materiaalien rakeisuudet on esitetty liitteellä 1. Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukainen kiviaineksen rakeisuusalue on esitetty kuvissa harmaalla. Moreenien hienoainespitoisuudet 0,074 mm kohdalla pienimmästä suurimpaan ovat 17, 26, 37 ja 45 %. Kalliomurskeiden rakeisuuskäyrät ovat roikkuvia ja hienoainespitoisuudet alle 5 %. Seulottaessa materiaalin M2 hienoaines tarttui seulaverkkoon tukkien pieniaukkoisimpia seuloja, mikä on voinut aiheuttaa virheellisyyttä rakeisuuskäyrän alaosaan. Materiaalien m1 ja m2 rakeisuuskäyrät ovat Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaisella B-ohjealueella. Materiaalien s1, m3 ja m4 rakeisuuskäyrät ovat ohjetta hienorakeisempia ja kalliomurskeiden rakeisuuskäyrät ohjetta kark eampia.

5.1.2 Humuspitoisuus ja humusluokka

Tutkimusmateriaalien polttohäviöt prosentteina kuivapainosta on esitetty liitteellä 1. Saven polttohäviö oli 2,6 %, moreenien 0,6...1,5 % ja kalliomurskeiden 0,8...1,9 %, paitsi kalliomurskeella M2, jonka polttohäviö oli huomattavan suuri (9,4 %) muihin verrattuna.

NaOH-menetelmällä määritetyt tutkimusmateriaalien humusluokat on esitetty liitteellä 1. Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaan materiaalien m2 ja m4 (humusluokka IV) osalta olisi sementin sitoutumisreaktioiden nopeus ja lujuuden kehitys tutkittava puristuslujuuskokeiden avulla. Loput, humusluokaltaan 0-II olevat materiaalit, kelpaisivat humusluokan perusteella sellaiseen stabiloitaviksi.

5.1.3 Humus- ja fulvohapot

Moreenien ja saven humus- ja fulvohappomääritysten tulokset on esitetty liitteellä 2. Saven humushappopitoisuus oli 13,82 % ja moreenien 0,18...0,49 %. Vastaavat fulvohappopitoisuudet olivat 2,48 % ja 0,16...0,57 %. Saven muita korkeammat pitoisuudet viittaavat siihen, että ko. savikerrostuma olisi muinaista merenpohjaa.

5.1.4 pH

Tutkimusmateriaalien alle 0,074 mm hienoaineksen ja alle 16 mm lajitteen pH-arvot on esitetty liitteellä 1. Kalliomurskeen M2 hienoaines tukki seulot-

taessa pieniauukkoisimpia seulaverkkoja, joten M2:n hienoaineksen pH on poikkeuksellisesti määritetty alle 0,125 mm lajitteesta. Muutoin riittävän näytemäärän seulominen olisi vaatinut suhteettoman paljon näytettä. Pääasiassa tutkimusmateriaalien pH-arvot olivat neutraaleja tai hieman happamia. Hienoaineksen pH-arvot olivat pienempiä kuin alle 16 mm lajitteella. Kalliomurskeiden M1, M2 ja M4 pH-arvot olivat huomattavan emäksiset (pH n. 9-10).

5.1.5 Sähkönjohtavuus

Tutkimusmateriaalien alle 0,074 mm hienoaineksen ja alle 16 mm lajitteen sähkönjohtavuudet on esitetty liitteellä 1. Kalliomurskeella M2 hienoaineksen sähkönjohtokyky on poikkeuksellisesti mitattu alle 0,125 mm lajitteesta (vrt. kappale 4.1.4). Liuosten sähkönjohtavuudet on korjauskertoimen avulla korjattu vastaamaan sähkönjohtavuutta 25 °C:ssa. Hienoaineksesta mitatut sähkönjohtavuudet olivat savella 6,08 mS/m, moreeneilla 0,31...4,03 mS/m ja kalliomurskeilla 2,27...8,4 mS/m, paitsi materiaalilla M5, jonka sähkönjohtavuus (14,5 mS/m) oli selvästi muita suurempi.

5.1.6 Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus

Parannetulla Proctor-kokeella määritetyt tutkimusmateriaalien maksimikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuudet on esitetty liitteellä 1. Vesipitoisuus on laskettu painoprosentteina materiaalin kuivapainosta. Moreeneilla määritykset on tehty alle 16 mm lajitteelle ja kalliomurskeilla alle 32 mm lajitteelle. Moreeneille on laskettu myös kivisyydellä (# 16...32 mm lajitteen osuus alle 32 mm lajitteesta painoprosentteina) korjattu optimivesipitoisuus.

Kalliomurskeilla Proctor-kokeen suorittaminen oli vaikeaa vähäisestä hienoainemäärästä johtuen. Ongelmitta tulos saatiin ainoastaan materiaalille M3. Materiaaleilla M1 ja M4 selvää vesipitoisuuden optimia ei löytynyt, joten niiden maksimikuivatilavuuspaino jouduttiin arvioimaan. Materiaalilla M2 Proctor-kokeen tuloksista muodostui polynomikäyrä, jolla oli kaksi huippua. Materiaali oli tiiveimmillään täysin kuivana sekä vesipitoisuuden ollessa 4,7 %. Koska jatkossa materiaalia ei kuitenkaan tiivistettäisi täysin kuivana, määritettiin maksimikuivatilavuuspaino kohdasta $w = 4,7 \%$. Materiaalin M5 kuivatilavuuspaino kasvoi lähes lineaarisesti vesipitoisuuden kasvaessa. Materiaali ei kuitenkaan pystynyt pidättämään vettä enempää kuin 7 %, joten maksimikuivatilavuuspaino luettiin tältä kohdalta.

Moreenien kivisyydellä korjatut optimivesipitoisuudet vaihtelivat välillä 6,0...7,4 % siten, että suurimmat optimivesipitoisuudet määritettiin eniten hienoainesta sisältäville materiaaleille. Maksimikuivatilavuuspainot (19,65...21,88 kN/m³) pienenevät hienoainepitoisuuden kasvaessa. Kalliomurskeiden maksimikuivatilavuuspainot vaihtelivat välillä 20,7...22,7 kN/m³.

Saven luonnontilaiseksi vesipitoisuudeksi saatiin 58,1 %. Tässä vesipitoisuudessa sullomalla määritetty maksimikuivatilavuuspaino oli $10,48 \text{ kN/m}^3$.

5.1.7 Plastisuus

Saven plastisuusmääritysten tulokset on esitetty liitteellä 1. Kieritysrajan (18,8 %) ja juoksurajan (44,2 %) perusteella saatiin plastisuusluvuksi 25,4 % (erittäin plastinen).

5.1.8 Kiintotiheys

Vedessä punnitsemalla ja avo-/pyknometrimenetelmällä määritetyt tutkimusmateriaalien kiintotiheydet on esitetty liitteellä 1. Savella pyknometrillä määritetty kiintotiheys oli $2,71 \text{ t/m}^3$, moreeneilla $2,63...2,68 \text{ t/m}^3$ ja kalliomurskeilla $2,65...2,87 \text{ t/m}^3$. Vedessä punnitsemalla saatu kiintotiheys oli yleensä hieman avopyknometrimenetelmällä määritettyä kiintotiheyden arvoa pienempi. Yleisesti erot eri menetelmillä saatujen tulosten välillä ovat pieniä, enimmillään $0,05 \text{ t/m}^3$.

5.1.9 Kapillaarisuus

Moreenien ja kalliomurskeiden kapillaarisuudet on esitetty liitteellä 1. Moreenien kapillaarisuudet vaihtelivat välillä $0,93...1,97 \text{ m}$ ja kalliomurskeiden välillä $0,42...0,59 \text{ m}$. Murskeille määritetyt kapillaarisuudet ovat luultavasti todellista suuremmat ja kuvaavat lähinnä murskekerroksen hienoainespitoisimman alaosan kapillaarisuutta.

5.1.10 Vedenadsorptioluku ja -pidätyskyky

Moreenien ja kalliomurskeiden alle $0,074 \text{ mm}$ hienoaineksen vedenadsorptioluvut on esitetty liitteellä 1. Moreenien vedenadsorptioluvuissa ($0,53...0,83 \%$) ei ole suuria eroja, sen sijaan kalliomurske M2 erottuu muista murskeista myös vedenadsorptioluvun ($1,88 \%$) osalta. Myös murskeen M5 hienoaineksen vedenadsorptioluku on suhteellisen suuri, mikä osaltaan selittää Proctor-kokeessa saavutettua suurehkoa optimivesipitoisuutta.

Tutkimusmateriaalien vedenpidätyskäyrät on esitetty liitteellä 1.

5.1.11 Hienoaineksen ominaispinta-ala

Moreenien ja kalliomurskeiden alle $0,063 \text{ mm}$ hienoaineksesta typpiadsorptiolaitteella määritetyt ominaispinta-alat on esitetty liitteellä 1. Selvästi suurin arvo on materiaalilla M2 ($10106 \text{ m}^2/\text{kg}$). Myös materiaalin M5 ominaispinta-ala on suhteellisen suuri ($4641 \text{ m}^2/\text{kg}$). Muiden materiaalien omi-

naispinta-alat vaihtelivat välillä 1048...3795 m²/kg. Kalliomurskeiden ominaispinta-ala ja vedenadsorptioluku ovat selvästi keskenään verrannollisia. Moreeneilla tulokset ovat huomattavasti epäjohdonmukaisemmat eikä selvää riippuvuutta ole havaittavissa.

5.1.12 Kuulamylyarvo

Kalliomurskeiden kuulamylyarvot on esitetty liitteellä 1. Kuulamylyarvon perusteella ainoastaan M4 täyttää Sementtistabilointiohjeen / 12/ lujuusluokkavaatimuksen. Rakentamisen laadunvarmistus -ohjeen / 6/ mukaan yksinomaan kuulamylyarvon perusteella luokiteltuna M4 (kuulamylyarvo 8,5 %) kuuluu lujuusluokkaan II, M2 (14,7 %) ja M3 (15,8 %) luokkaan IV. M1 (34,7 %) sekä M5 (26,9 %) ovat luokattomia.

5.1.13 Liuskeisuus

Kalliomurskeiden liuskeisuudet on esitetty liitteellä 1. M1, M2, M3 ja M5 kuuluvat Asfalttinormien 1995 / 1/ mukaan muotoluokkaan III. M4 on luokaton.

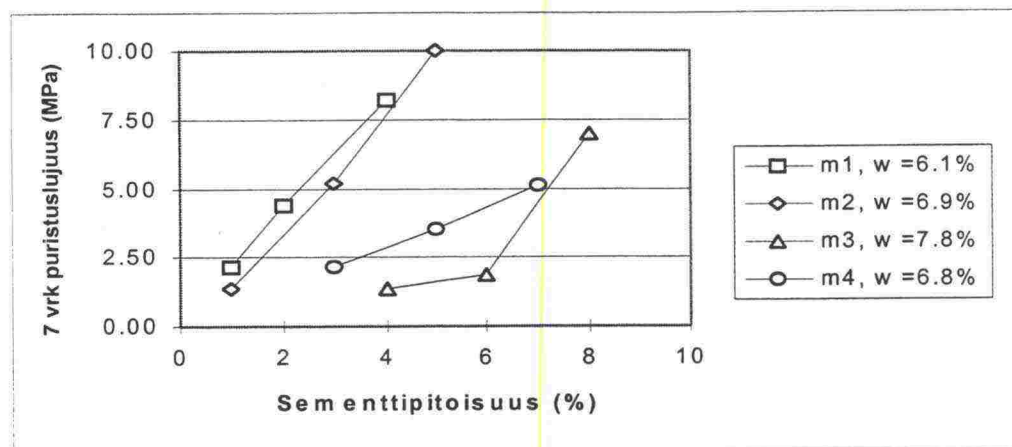
5.1.14 Mineraalikoostumus

Tutkimusmateriaalien alle 0,074 mm hienoaineksesta sekä karkeammasta # 10...16 mm lajitteesta määritetyt mineraalit on esitetty liitteellä 3. Pääasiassa materiaalit sisälsivät kvartsia, maasälpä ja amfioleja. Suurimmassa osassa näytteitä esiintyi myös kiillemineraaleja sekä pehmeää kloriittia.

5.2 Ennakkokokeiden tulokset

5.2.1 Puristuslujuus

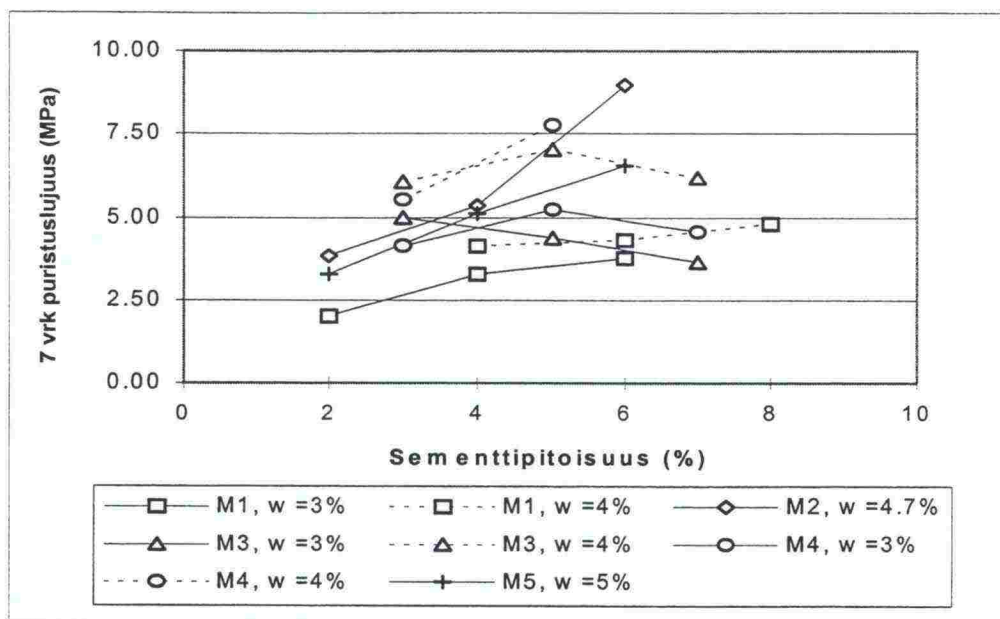
Moreenikoekappaleet valmistettiin alle 16 mm lajitteesta liitteen 1 mukaisilla korjatuilla vesipitoisuuksilla 100 %:n tiiviysasteeseen kiviaineksen maksimikuivatilavuuspainosta. Alustavat sideainemäärät luettiin Sementtistabilointiohjeen / 12/ suhteitustaulukosta, tavoitelujuuden ollessa 5 MPa 7 vrk:n iässä. Ohjeen mukaiset sementtimäärät olivat moreeneille m1 4,5 %, m2 6,3 %, m3 10,6 % ja m4 8,8 % kiviaineksen kuivapainosta. Moreenien 7 vrk:n puristuslujuudet sementtipitoisuuden funktiona on esitetty kuvassa 11. Puristuslujuudet on korjattu Sementtistabilointiohjeen / 12/ korjauskäyrän mukaan vastaamaan sellaisen koekappaleen lujuutta, jonka h/d-suhde on 1. Tavoitelujuus saavutettiin ohjearvoa noin 2-4 prosenttiyksikköä pienemmällä sideainemäärällä, kun ohjeen mukaisilla sementtipitoisuuksilla 7 vrk:n lujuudet olisivat olleet arviolta jopa kaksinkertaiset tavoitelujuuteen verrattuna.



Kuva 11: Moreenien 7 vrk:n puristuslujuudet.

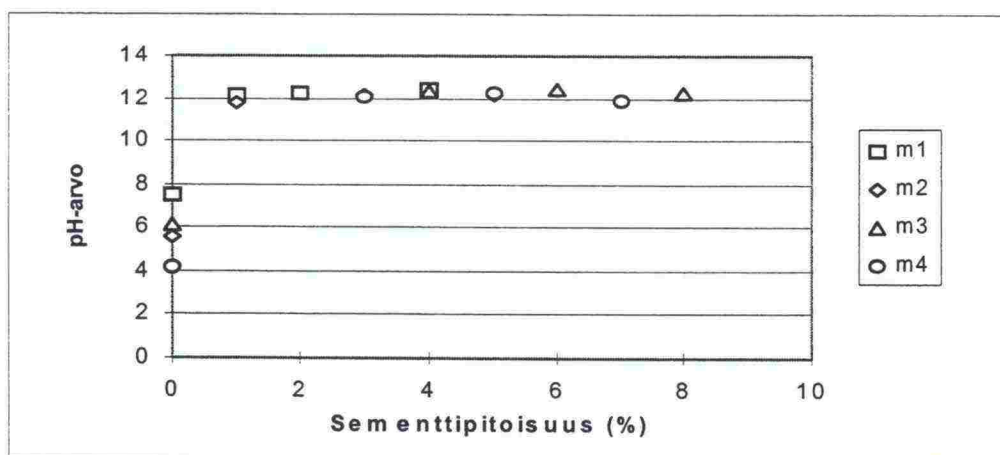
Kalliomurskeilla ainoastaan materiaalin M2 ennakkokoekappaleet voitiin valmistaa liitteen 1 mukaisessa optimivesipitoisuudessa. Murskeelle M3 saatu optimivesipitoisuus oli liian pieni sementin riittävää hydrataatiota ajatellen. Murskeen M5 optimivesipitoisuus oli puolestaan liian suuri, sillä vesi valui ulos muotista tiivistysvaiheessa. Sopiva vesipitoisuus murskeelle M5 oli 5 %, jolloin vesi ei enää tihkunut muotista. Materiaalien M1, M3 ja M4 ennakkokoekappaleet valmistettiin vesipitoisuuksilla 3 ja 4 %. Koekappaleet tiivistettiin 100 %:n tiiviyssasteeseen kiviaineksen maksimikuivatilavuuspainosta.

Alustavat sideainemäärät luettiin Sementtistabilointiohjeen / 12/ suhteitustaulukosta, tavoitelujuuden ollessa 5 MPa 7 vrk:n iässä. Ohjeen mukaiset sementtimäärät olivat murskeille M1 4,2 %, M2 3,5 %, M3 5,9 %, M4 5,8 % ja M5 3,3 % kiviaineksen kuivapainosta kivisyyskorjaus huomioituna. Murskeiden 7 vrk:n puristuslujuudet sementtipitoisuuden funktiona on esitetty kuvassa 12. Puristuslujuudet on korjattu Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaan vastaamaan sellaisen koekappaleen lujuutta, jonka h/d-suhde on 1. Kalliomurskeilla ohjeen / 12/ mukaisilla sementtipitoisuuksilla saatavat lujuudet vastaavat tavoitelujuutta 5 MPa suhteellisen hyvin, mutta lujuus riippuu huomattavasti massan vesi-sementtisuhteesta. Vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,7 hidastuu puristuslujuuden kasvu sementtipitoisuuden funktiona. Vesi-sementtisuhteen edelleen pienentyessä lujuus alkaa lopulta heiketä. Lujuuden heikkeneminen johtuu ilmeisesti sementin heikosta hydrataatiosta, jolloin hydratoitumaton sementtijauho haittaa sidosten syntymistä runkoaineen rakeiden välille.

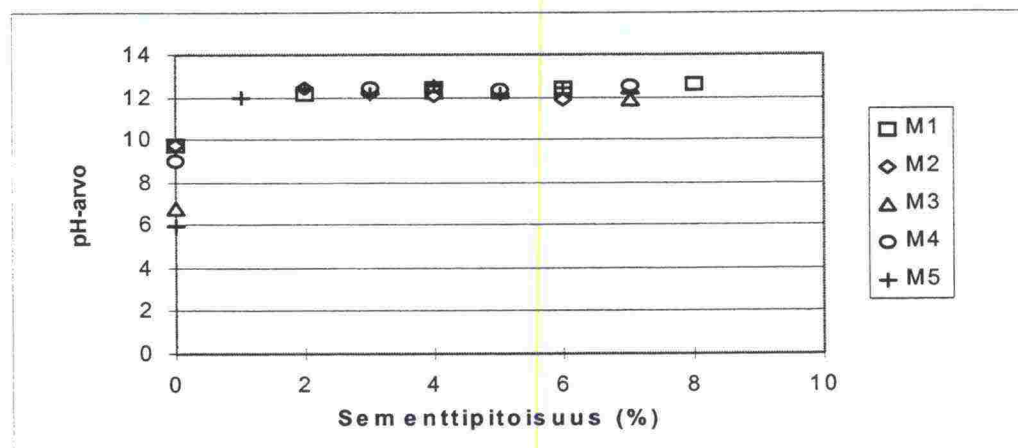


Kuva 12: Kalliomurskeiden 7 vrk:n puristuslujuudet.

Moreeneista ja kalliomurskeista valmistettujen ennakkokoemassojen pH-arvot sementtipitoisuuden funktiona on esitetty kuvissa 13 ja 14. Jo pienikin sementin lisäys nostaa pH-arvon riittävän emäksiseksi hydrataation kannalta, jolloin Sementtistabilointiohjeen / 12/ suositama ylimääräinen sementtilisäys humuksen neutraloimiseksi on tämän tutkimuksen mukaan tarpeeton.

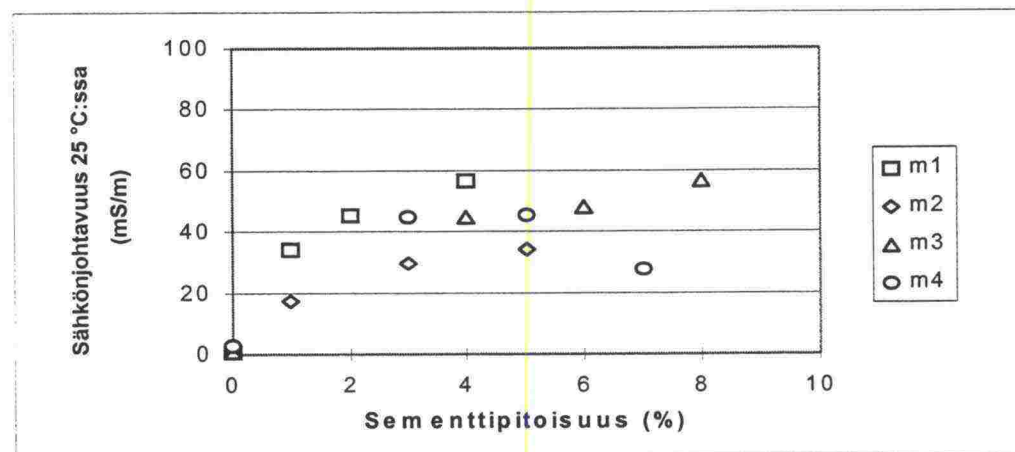


Kuva 13: Moreenien ennakkokoemassojen pH-arvot sementtipitoisuuden funktiona. Arvot sementtipitoisuudella 0 % on mitattu runkoaineen alle 16 mm lajitteesta.

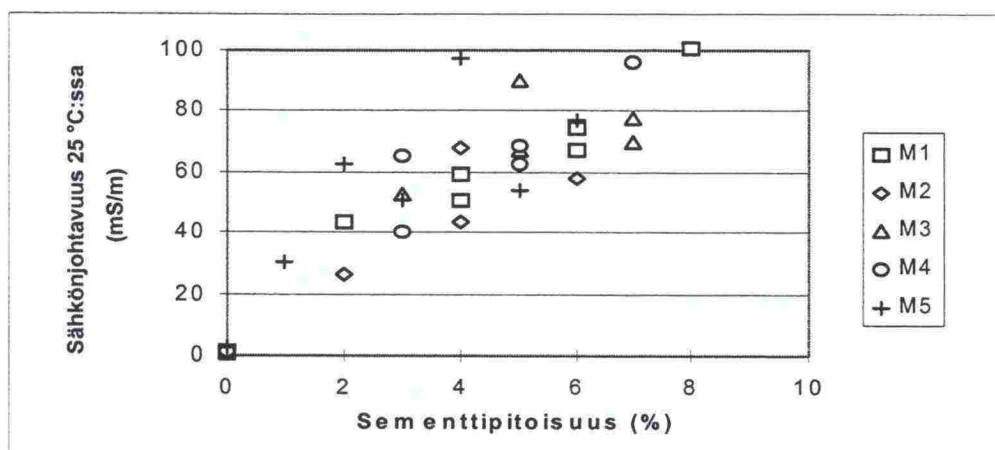


Kuva 14: Kalliomurskeiden ennakkokoemassojen pH-arvot sementtipitoisuuden funktiona. Arvot sementtipitoisuudella 0 % on mitattu runkoaineen alle 16 mm lajitteesta.

Ennakkokoemassojen sähkönjohtavuudet sementtipitoisuuden funktiona 25 °C:ssa on esitetty kuvissa 15 ja 16. Sementin lisäys kasvattaa sähkönjohtavuuksia.



Kuva 15: Moreenien ennakkokoemassojen sähkönjohtavuus sementtipitoisuuden funktiona. Arvot sementtipitoisuudella 0 % on mitattu runkoaineen alle 16 mm lajitteesta.



Kuva 16: Kalliomurskeiden ennakkoemassojen sähkönjohtavuus sementtipitoisuuden funktiona. Arvot sementtipitoisuudella 0 % on mitattu runkoaineen alle 16 mm lajitteesta.

5.2.2 Massojen valinta jäädytys-sulatuskokeisiin

Moreeneilla jatkoon valittiin ne sementtipitoisuudet, joilla stabilointi ennakkokokeissa saavutti tavoitelujuuden 5 MPa. Lisäksi valittiin myös massat, joiden sementtipitoisuus oli ± 2 % tavoitelujuuden antavasta sementtipitoisuudesta. Sementtipitoisuuden alaraja oli kuitenkin 1,5 %, jota pienempiä määriä on käytännössä vaikea saada sekoittumaan tasaisesti runkoaineeseen. Moreeneilla m1 ja m2 valitut sideainemäärät olivat 1,5 %, 2,5 % ja 4,5 % ja moreeneilla m3 ja m4 5 %, 7 % ja 9 %.

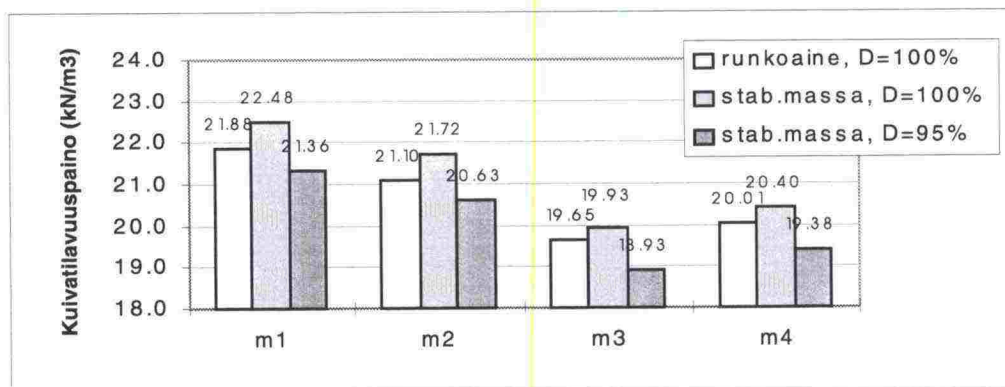
Kalliomurskeiden Proctor-kokeiden epävarmat ja tulkinnalliset tulokset aiheuttivat mitä ilmeisemmin virhettä ennakkokokeiden tuloksiin, jolloin puristuslujuudet eivät enää ole toisiinsa nähden vertailukelpoisia. Kun lisäksi kalliomurskeiden lujuus oli ennakkokokeissa erittäin suuresti riippuvainen stabilointimassan vesi-sementtisuhteesta todettiin sideainepitoisuuksien valinta em. tavalla tarkoituksettomaksi. Tämän johdosta pakkaskokeessa käytettäväksi sementtipitoisuuksiksi valittiin kaikille kalliomurskeille 3, 5 ja 7 %. Vesipitoisuudeksi valittiin kaikille massoille 4,5 % runkoaineen ja sementin kuivapainosta, jolloin vesi-sementtisuhteet olivat 1,55, 0,95 ja 0,69. Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaan maabetonin vesi-sementtisuhteen tulisi olla 0,7-1,0.

5.3 Jäätymis-sulamiskestävyys

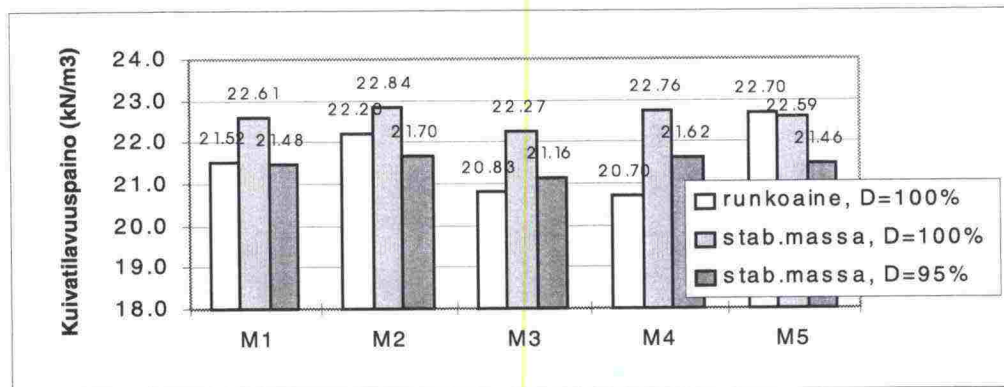
5.3.1 Massojen tilavuuspaino

Keskimmäisellä sideainepitoisuudella valmistettujen stabilointimassojen maksimikuivatilavuuspainot on esitetty kuvissa 17 ja 18. Moreenimassat

valmistettiin kivisyydellä korjatussa optimivesipitoisuudessa, murskeilla massan vesipitoisuus oli aiemmin valittu 4,5 %. Vertailun vuoksi kuvaan on otettu myös runkoaineiden maksimikuivatilavuuspainot sekä massojen kuivatilavuuspainot 95 %:n tiiviysasteessa. Tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että runkoaineiden ja stabilointimassojen tilavuuspainot on määritetty eri vesipitoisuuksilla. Moreenistabilointimassat poikkeavat runkoaineesta myös rakeisuutensa perusteella. Kalliomurskeilla sementti toimii fillerin tavoin täyttäen runkoaineen huokosia, jolloin stabilointimassan kuivatilavuuspaino kasvaa murskeen tilavuuspainoa suuremmaksi. Moreeneilla tilavuuspainon kasvu em. syystä on vähäisempää, koska niillä hienoaineksen määrä on suurempi. Tilavuuspainoa kasvattavat myös sementin runkoainetta suurempi kiintotiheys ja hydrataatioreaktiossa sitoutuneen veden massa.



Kuva 17: Moreenien ja stabilointimassojen kuivatilavuuspainot.



Kuva 18: Kalliomurskeiden ja stabilointimassojen kuivatilavuuspainot.

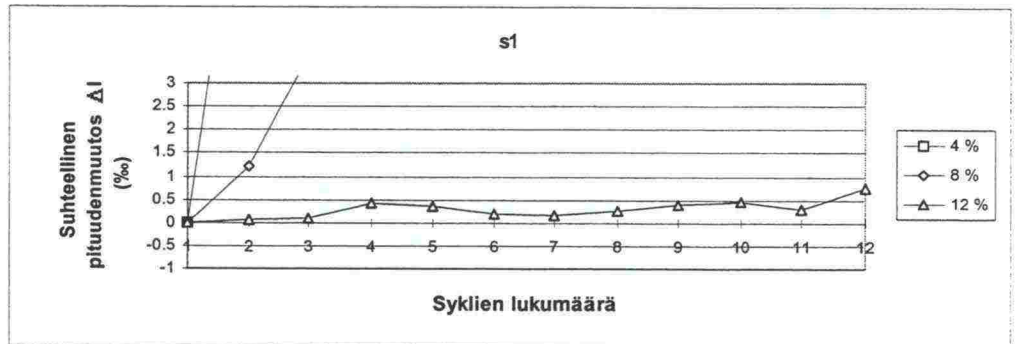
5.3.2 Pituuden muutos

Tutkimusmateriaaleista valmistettujen jäädytys-sulatuskoekappaleiden keskeisimmät tiedot on koottu liitteelle 4. Liitteellä 5 on esitetty valokuvia koekappaleista kokeen aikana ja sen jälkeen.

Jäädytys-sulatuskokeen aikana tapahtunut pituuden laajeneminen oli suurinta materiaalilla s1. Sementtipitoisuuksilla 4 % ja 8 % koekappaleiden suhteellinen pituuden kasvu ylitti raja-arvon 1 % heti kokeen alussa (Kuva 19)

ja kokeen aikana koekappaleet katkeilivat tiivistyskerrosrajojen kohdalta. Sementtipitoisuudella 12 % materiaali täytti pituuden kasvua koskevat vaatimukset. Kuitenkin, mikäli koetta olisi jatkettu, olisi 1 ‰:n raja-arvo luultavasti ylittynyt.

Koekappaleiden suhteellista pituuden muutosta kuvaavat käyrät on laskettu kolmen rinnakkaisen koekappaleen mittaustulosten keskiarvona.

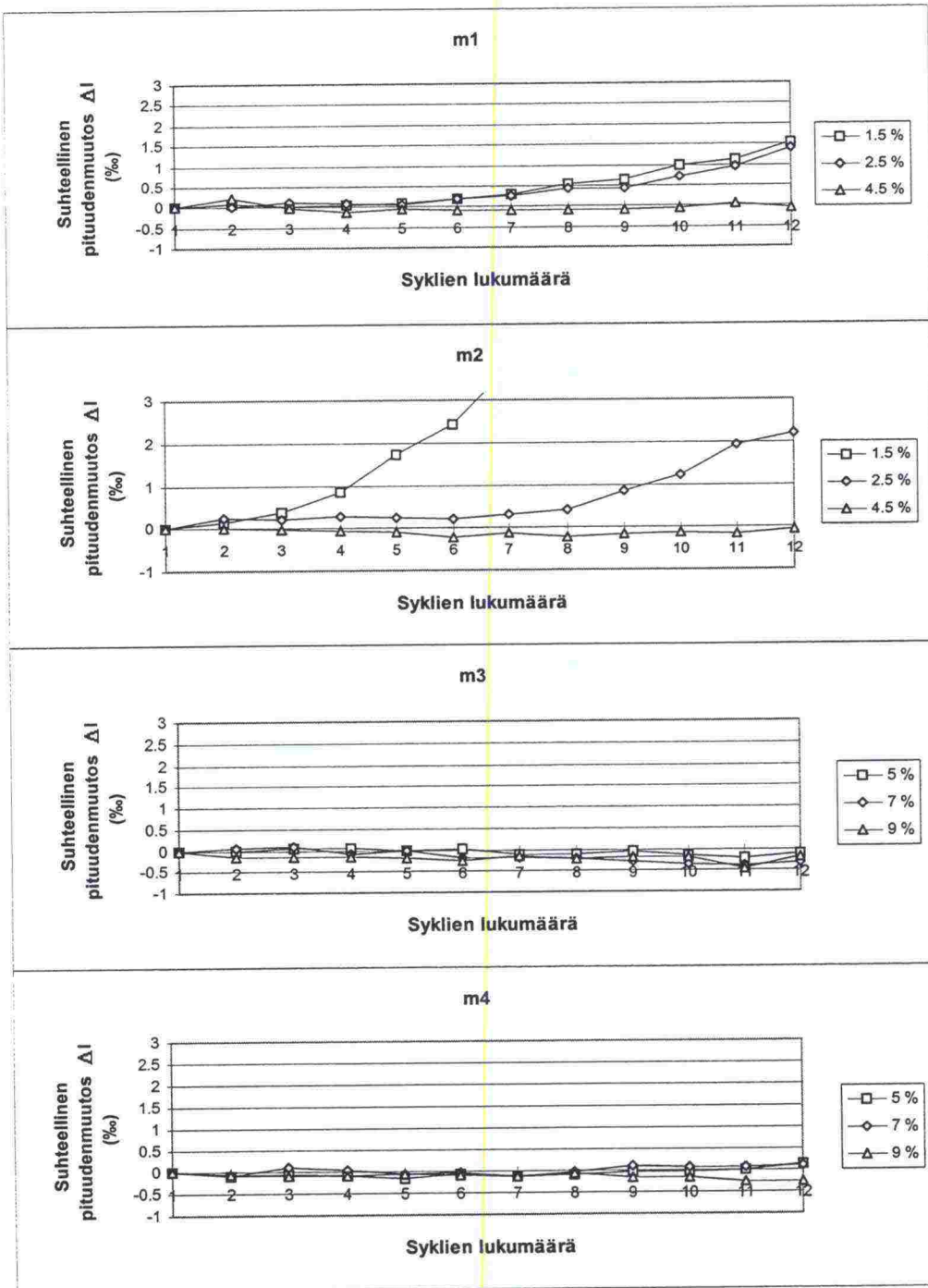


Kuva 19: Koekappaleiden suhteellinen pituuden muutos jäädytys-sulatuskokeen aikana eri sementtipitoisuuksilla materiaalilla s1.

Stabiloitujen moreenikoekappaleiden suhteellinen pituuden kasvu jäädytys-sulatuskokeen aikana ylitti raja-arvon materiaaleilla m1 ja m2 sementtipitoisuuksilla 1,5 % ja 2,5 % (Kuva 20). Verrattaessa yksittäisten koekappaleiden tuloksia keskenään nähdään, että sementtipitoisuudella 1,5 % on materiaalin m1 tuloksissa suurta hajontaa. Kahdella kolmesta kappaleesta pituuden kasvua ei tapahdu, mutta kolmannen kappaleen suhteellinen laajeneminen on lähes 5 ‰. Myös materiaalilla m2 sementtipitoisuudella 1,5 % hajonta on huomattavaa. Ilmeisesti hajonta johtuu sideaineen epätasaisesta levittymisestä stabilointimassassa.

Kokeen aikana kaksi kolmesta materiaalin m2 pienimmällä sementtipitoisuudella valmistetusta koekappaleesta hajosi kokonaan ja muutkin sementtipitoisuuksilla 1,5 % ja 2,5 % valmistetut koekappaleet rapautuivat pintaosistaan. Rapautuminen johtui huokosiin imeytyneestä vedestä, joka jäätyessään laajeni rapauttaen koekappaleiden pintakerroksia. Rapautuminen eteni koko ajan jäädytys-sulatussykliin lukumäärän kasvaessa.

Materiaalin m2 koekappaleiden suhteellinen pituuden kasvu kokeen aikana oli suurempaa kuin materiaalilla m1. Kokeen aikana materiaalin m2 koekappaleet myös imivät kosteutta selvästi materiaalia m1 enemmän. Syynä tähän olivat ilmeisesti erot runkoaineen hienoainespitoisuudessa sekä hydraulisisä ominaisuuksissa. Materiaalit m3 ja m4 kaikilla sementtipitoisuuksilla sekä materiaalit m1 ja m2 sementtipitoisuudella 4,5 % täyttivät pituuden kasvua koskevat vaatimukset. Tulosten perusteella näyttäisi siltä, että jäätymsulamiskestävyys kannalta sementtipitoisuuden alaraja routivilla moree-neilla tulisi olla 3-4 %.



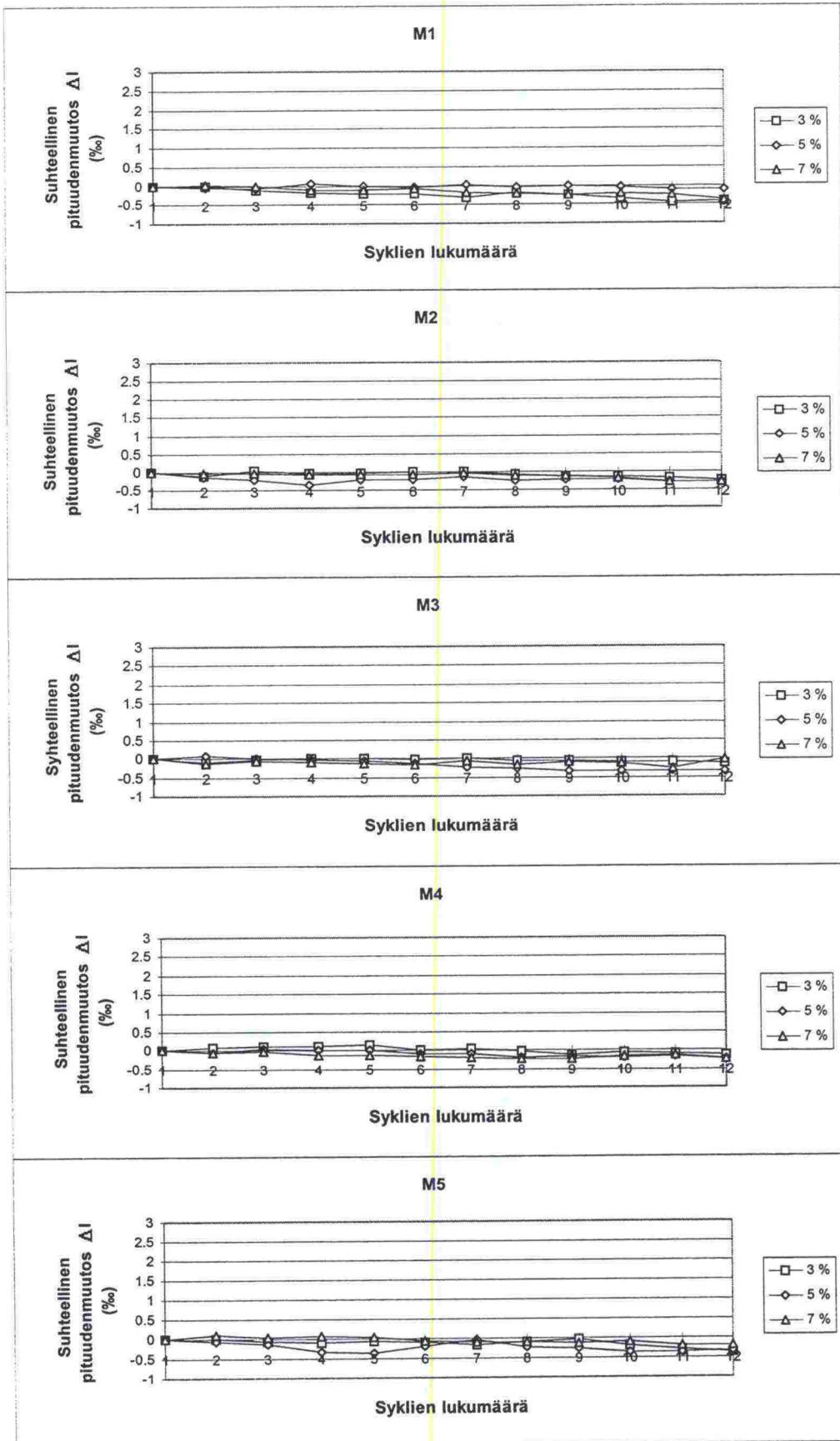
Kuva 20: Koekappaleiden suhteellinen pituuden muutos jäädytys-sulatuskokeen aikana eri sementtipitoisuuksilla materiaaleilla m1, m2, m3 ja m4.

Stabiloiduilla kalliomurskekoekappaleilla pituuden laajeneminen jäädytys-sulatuskokeen aikana oli hyvin pientä, kaikilla materiaaleilla ja sementtipitoisuuksilla selvästi alle 0,5 ‰ (Kuva 21). Kaikilla materiaaleilla suhteellinen pituuden muutos 12. syklin jälkeen oli negatiivista eli koekappaleet kutistui-
vat kokeen aikana. Kutistuminen näyttäisi myös olevan jatkuvaa ja sementtipitoisuudesta riippumatonta. Laajenemisen lisäksi myös kutistuminen voi olla haitallista, sillä ns. kutistumishalkeilu voi vaurioittaa maabetonirakennetta. Kutistumista ei nähtävästi kuitenkaan saksalaisen käytännön mukaan

pidetä jäädytys-sulatuskokeessa tärkeänä, sillä sen suhteen ei ole esitetty mitään raja-arvoja.

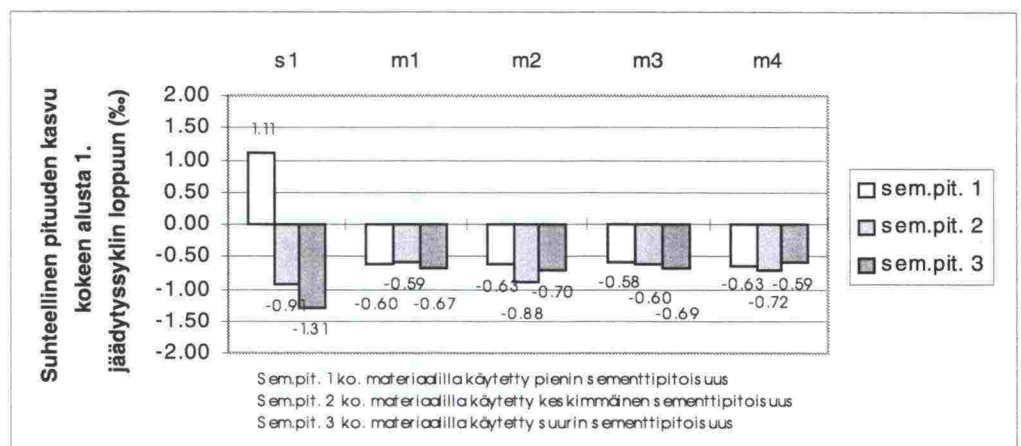
Kalliomurskeet eivät juurikaan imeneet vettä kokeen aikana, mistä johtuen niiden rapautuminen oli vähäistä. Käsittelyn yhteydessä koekappaleiden reunoista irtosi muutamia kiviä.

TUTKIMUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

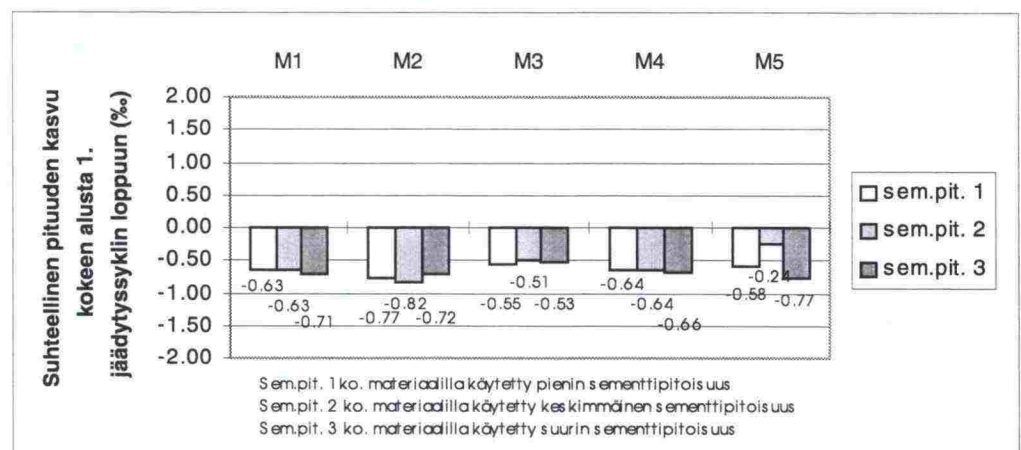


Kuva 21: Koekappaleiden suhteellinen pituuden muutos jäädytys-sulatuskokeen aikana eri sementtipitoisuuksilla materiaaleilla M1, M2, M3, M4 ja M5.

Kaikki materiaalit, lukuunottamatta materiaalia s1 sementtipitoisuudella 4 %, kutistuivat 1. jäädytysjakson aikana normaalin lämpölaajenemiskäyttäytymisen seurauksena (Kuva 22 ja Kuva 23). Suurimmillaan suhteellinen kutistuma kokeen alusta 1. jäädytysyösklin loppuun oli materiaalilla s1 yli 1 % ja stabiloiduilla moreeneilla ja kalliomurskeilla hieman alle 1 %. Stabiloitujen moreenien ja kalliomurskeiden kokeen alussa ja sen aikana tapahtunut yhteenlaskettu kutistuminen oli muutamilla materiaaleilla yli 1 %, mikä valmiissa rakennekerroksessa tarkoittaisi 10 mm:n kutistumaa 10 metrin matkalla. Yleisesti kutistumisen suuruus ei ollut riippuvainen sementin määrästä. Poikkeuksena oli kuitenkin materiaali s1, jonka kutistuma kasvoi sementin määrän kasvaessa. Tulokset on laskettu kolmen rinnakkaisen koekappaleen mittaustulosten keskiarvona. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteellä 4.



Kuva 22: Koekappaleiden suhteellinen pituuden muutos jäädytys-sulatuskokeen alusta 1. jäädytysyösklin loppuun materiaaleilla s1, m1, m2, m3 ja m4.



Kuva 23: Koekappaleiden suhteellinen pituuden muutos jäädytys-sulatuskokeen alusta 1. jäädytysyösklin loppuun materiaaleilla M1, M2, M3, M4 ja M5.

5.3.3 Puristuslujuus

Yhdelläkään tutkittavista massoista, lukuunottamatta materiaalia M1, ei yksiaksiaalinen puristuslujuus kasvanut jäädytys-sulatussykliä aikana (*Kuva 24*). Materiaaleilla s1 ja m2 ei puristuslujuutta alhaisimmilla sementtipitoisuuksilla voitu määrittää lainkaan, koska koekappaleet hajosivat jäädytys-sulatuskokeen aikana. Kukin puristuslujuustulos on laskettu kahden rinnakkaisen koekappaleen tulosten keskiarvona. Poikkeuksena tästä on materiaali m2 sementtipitoisuudella 2,5 %, jonka jäädytys-sulatuskokeen jälkeinen lujuus on voitu määrittää vain yhdestä kappaleesta toisen hajottua jäädytys-sulatuskokeen aikana. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteellä 4.

Savi s1 osoitti jäätymis-sulamiskestävyyttä vasta sementtipitoisuudella 12 %. Ko. sementtipitoisuudella sen puristuslujuus aleni kokeen aikana noin neljänneksen ennen koetta määritetystä lujuudesta. Puristuslujuustuloksissa oli myös melko paljon vaihtelua, mikä osoittaa, että sementti ei ole yrityksestä huolimatta sekoittunut riittävän tasaisesti stabilointima ssaan.

Moreeneilla puristuslujuus aleni kahdella pienimmällä sementtipitoisuudella keskimäärin 20-30 % ennen jäädytys-sulatuskoetta määritetystä lujuudesta. Materiaaleilla m1 ja m2 lujuuden heikkeneminen oli muita suurempaa, mikä luultavimmin johtuu liian pienestä sementtipitoisuudesta ja heikosta sitoutumisesta. Materiaalin m2 lujuustaso kahdella pienimmällä sementtipitoisuudella oli myös selvästi muita materiaaleja alhaisempi. Suurimmalla sementtipitoisuudella moreenien lujuudet heikkenivät alle 10 % alkuperäisestä lujuudesta lukuunottamatta moreenia m2, jonka lujuus heikkeni yli 20 %.

Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaisella vähimmäis-sementtipitoisuudella 3,5 % (asemasekoitus) materiaalin m1 lujuus heikkenisi jäädytys-sulatuskokeen aikana arviolta 20 % ja materiaalin m2 lujuus arviolta 50 % ennen koetta mitattua lujuudesta. Rakeisuusohjealuetta hienorakeisemmilla moreeneilla m3 ja m4 Sementtistabilointiohjeen / 12/ ennakkokokeiden mukaisella sementtipitoisuudella lujuus heikkeni noin neljänneksen. Luvut ovat varsin suuria, kun niitä vertaa eri maissa käytössä oleviin jäädytys-sulatuskokeiden puristuslujuuskriteereihin / 15/. Esimerkiksi Sveitsin normien mukaan puristuslujuus ei saa jäädytys-sulatuskokeen aikana alentua lainkaan, Ranskassa korkeintaan 30 %. Lujuustasovaatimukset eivät kuitenkaan ole täysin verrannolliset keskenään, koska jäädytys-sulatuskokeiden syklien määrä, pituus ja lämpötilat vaihtelevat.

Kalliomurskeiden M1 ja M4 voidaan katsoa olevan puristuslujuuden kannalta jäätymis-sulamiskestäviä kaikilla kolmella sementtipitoisuudella. Niillä puristuslujuudet eivät juurikaan heikentyneet jäädytys-sulatuskokeen aikana. Itse asiassa osalla koekappaleista näyttäisi lujittumista tapahtuneen vielä syklien aikana. Toisaalta etenkin materiaalin M1 tuloksissa esiintyy niin paljon vaihtelua, että täysin varmoja kokeen aikaisesta lisälujittumisesta ei voida olla. Mo-

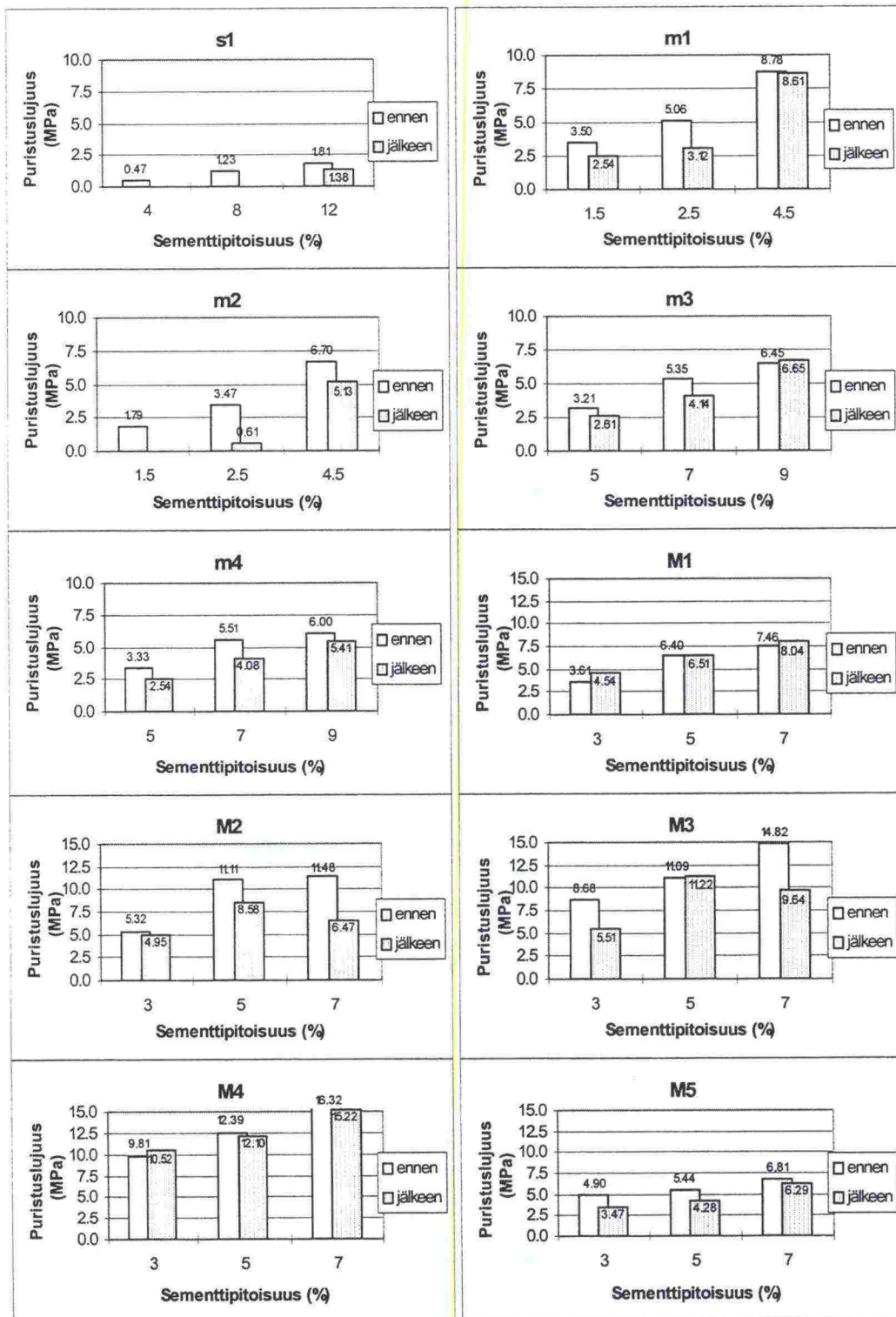
lemmilla materiaaleilla lujuustulosten hajonta jäädytys-sulatuskokeen jälkeen on selvästi suurempaa kuin ennen koetta.

Puristuslujuuden perusteella arvioituna materiaalin M5 jäädytys-sulatuskestävyys paranee sementtipitoisuuden kasvaessa. Sementtipitoisuudella 7 % puristuslujuus aleni jäädytys-sulatussykliä aikana alle 10 %. Muihin materiaaleihin verrattuna materiaalien M1 ja M5 lujuudet olivat selvästi muita alhaisemmat. Syynä tähän on muita heikompi kiviaines. Mitä ilmeisemmin tämän tyyppisillä heikoilla kiviaineksilla jäätymis-sulamiskestävyyttä suuremmaksi ongelmaksi muodostuu riittävän lujuustason saavuttaminen nykyisten ohjeiden mukaan stabiloitaessa.

Kalliomurskeet M2 ja M3 käyttäytyivät muista poikkeavasti. Materiaalilla M2 jäädytys-sulatussykliä aikana tapahtuva lujuuden suhteellinen heikkeneminen näyttäisi olevan sitä suurempaa mitä enemmän sementtiä stabilointimassa sisältää. Materiaali M2 poikkeaa muista myös siinä suhteessa, että 28 vrk:n lujuus ei ole enää oleellisesti kasvanut sementtipitoisuuden lisääntyessä 5 %:sta 7 %:in. Luultavasti materiaalin poikkeava käyttäytyminen johtuu muita murskeita paremmasta vedenpidätys- ja adsorptiokyvystä. Tällöin vesi-sementtisuhteen pienentyessä hienoaaines ja sementti alkavat kilpailla vedestä, sementin hydratoitumiseen käytettävissä oleva vesimäärä pienenee ja massan sitoutuminen heikkenee. Heikomman sitoutumisen vuoksi jäädytys-sulatussyklit vaikuttavat materiaalin M2 lujuuteen muita voimakkaammin. Tulosten tulkintaa vaikeuttaa jäädytys-sulatuskokeen jälkeisten lujuustulosten suuri vaihtelu sementtipitoisuuksilla 3 % ja 7 %.

Materiaalin M3 lujuuskäyttäytymiselle on vaikea löytää mitään yksiselitteistä syytä. Käyttökelpoisin selitys on ehkä liian alhainen sementtipitoisuus (3 %), jolloin sementtiä ei ole tarpeeksi sitomaan kivirakeita riittävän lujasti yhteen, sekä toisaalta liian suuri sementtipitoisuus (7 %), jolloin vesi-sementtisuhte jää tälle materiaalille liian alhaiseksi.

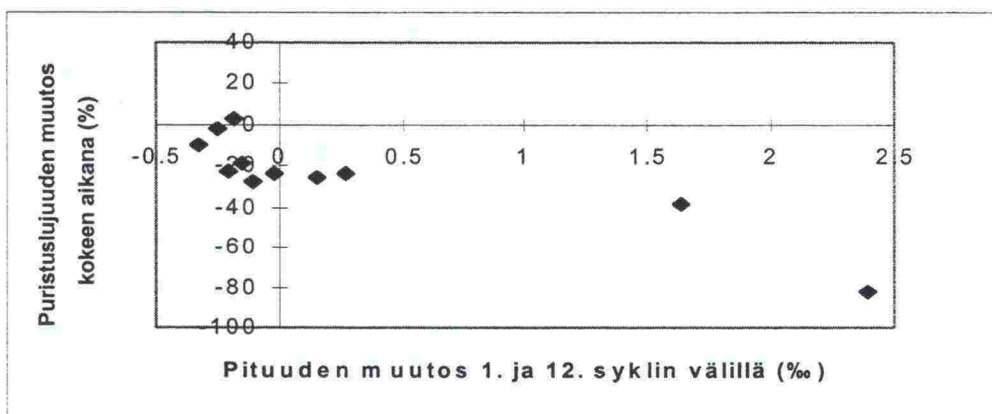
Yleisesti ottaen kalliomurskeiden lujuudenkehitys jäädytys-sulatussykliä aikana vaihtelee suuresti kiviaineksesta ja sen laadusta riippuen. Tulosten perusteella näyttäisi, että puristuslujuuden säilyminen sykliä aikana on riippuvainen sementtipitoisuudesta vain tiettyyn materiaalikohtaiseen rajaan saakka. Tämän johdosta, mikäli jäätymis-sulamiskestävyyttä halutaan arvioida puristuslujuuden perusteella, tulisi jokainen käytettäväksi suunniteltu tutkittujen materiaalien M1-M5 kaltainen materiaali testata ennakkoon useammalla eri sideainepitoisuudella.



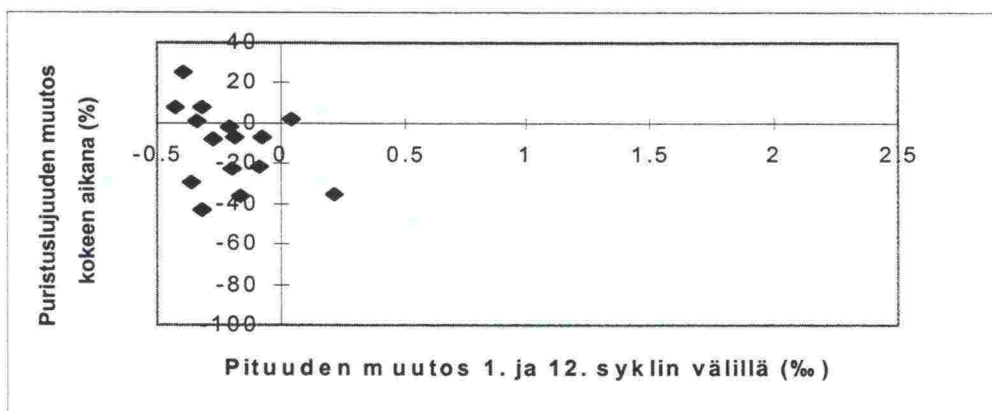
Kuva 24: Koekappaleiden yksiakiaaliset puristuslujuudet ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen.

Jäädytys-sulatuskokeen 1. ja 12. syklin välisen suhteellisen pituuden muutoksen (kpl 4.3.2) ja jäädytys-sulatuskokeen aikana tapahtuneen yksiakiaalisen puristuslujuuden suhteellisen muutoksen välinen riippuvuus on stabiloitujen moreenien osalta esitetty kuvassa 25 ja stabiloitujen kalliomurskeiden osalta kuvassa 26. Pisteet on laskettu kaikilla kolmella sideainepitoisuudella

kahden rinnakkaisen koekappaleen keskiarvoista siten, että pituuden muutoksen laskennassa on huomioitu vain ne koekappaleet, joista jäädytys-sulatuskokeen jälkeen määritettiin puristuslujuus.



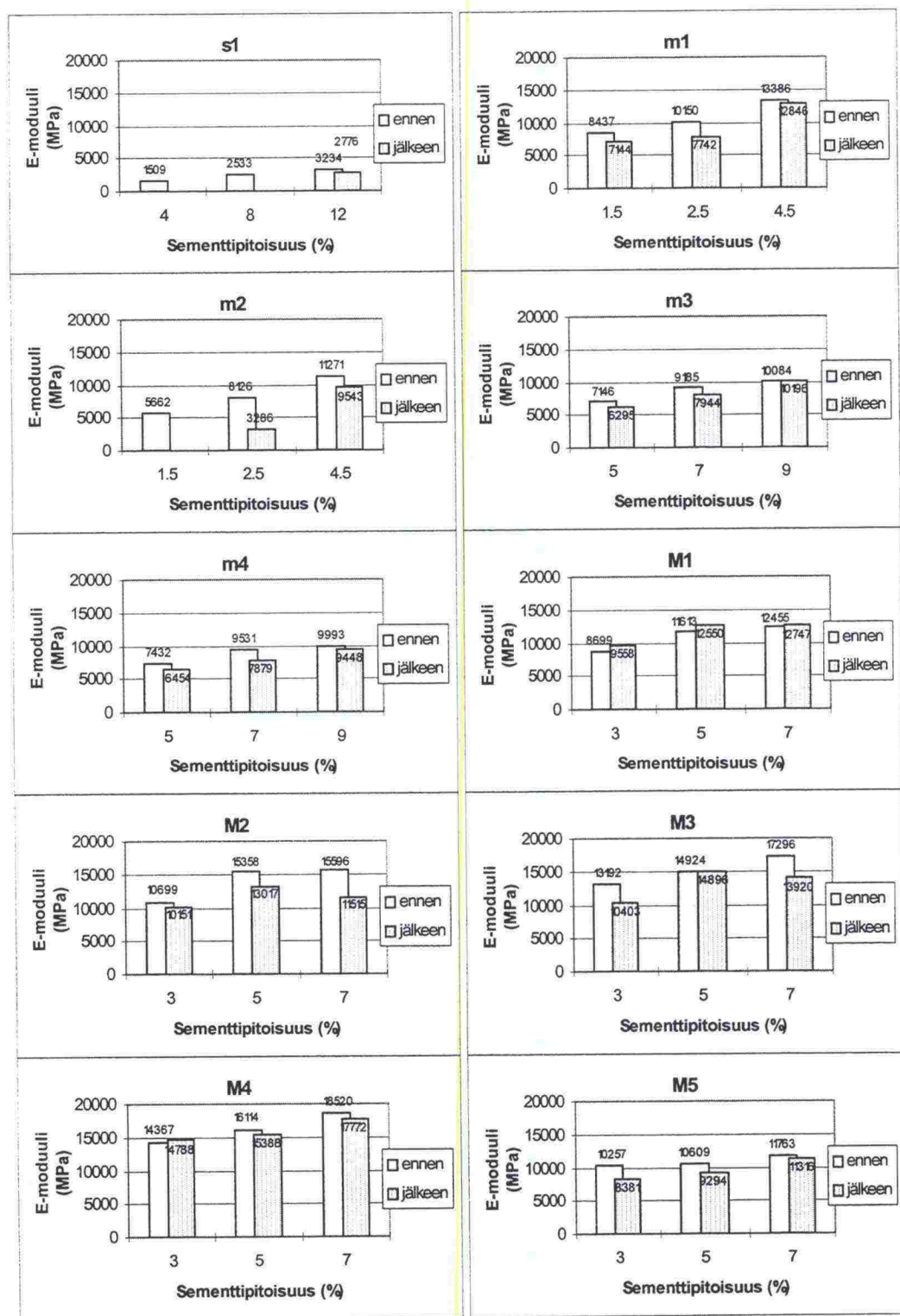
Kuva 25: Jäädytys-sulatussykliin aiheuttaman pituuden ja puristuslujuuden muutoksen välinen korrelaatio materiaaleilla m1, m2, m3 ja m4.



Kuva 26: Jäädytys-sulatussykliin aiheuttaman pituuden ja puristuslujuuden muutoksen välinen korrelaatio materiaaleilla M1, M2, M3, M4 ja M5.

5.3.4 Staattinen kimmomoduuli

Stabiloiduille tutkimusmateriaaleille puristuslujuuden ja tiheyden perusteella lasketut E-moduuliarvot vastasivat Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaisia maabetonin E-moduuli-arvoja 4000...8000 MPa ohjeen mukaisella vähimmäissementtipitoisuudella 3,5 % (Kuva 27). Osalla kalliomurskeista E-moduulit vastaavat jopa jyräbetonin arvoja. Koska laskennalliset E-moduuliarvot riippuvat puristuslujuudesta, on jäädytys-sulatussykliin vaikutus E-moduuliin samankaltainen kuin vaikutus puristuslujuuteen. Kuvassa 27 esitetyt E-moduuliarvot on laskettu kahden rinnakkaisen koekappaleen tulosten keskiarvona. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteellä 4.



Kuva 27: Koekappaleiden laskennalliset E-moduulit ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen.

5.3.5 Dynaaminen kimmomoduuli

Stabiloidulla savella sekä moreeneilla mitatut dynaamisen kimmomoduulin arvot ovat huomattavasti pienemmät kuin Sementtistabilointiohjeessa / 12/ annetut sekä kappaleen 4.3.4 mukaiset laskennalliset E-moduuliarvot (Taulukko 1, Kuva 28, Kuva 29). Todelliset dynaamisen kimmomoduulin arvot näillä materiaaleilla ovat mitattuja suuremmat. Mittausvirhe aiheutuu käytetystä mittaustekniikasta. Mitattaessa kovien kappaleiden pystysiirtymää sellin ulkopuolelta muodostuvat koelaitteiston joustosta aiheutuvat siirtymät koekappaleen siirtymiä suuremmiksi, jolloin saadut moduulit ovat todellisia arvoja pienemmät. Tässä tutkimuksessa laitteiston jousto pyrittiin huomioimaan vähentämällä kokeessa mitatuista kimmoisista pystysiirtymistä laitteistolle mitattu jousto. Laitteiston jousto määritettiin kuormittamalla jäykkää teräskappaletta, jonka pystysiirtymä oletettiin nolaksi, vastaavissa koeolosuhteissa. Taulukon 1 savi- ja moreeninäytteiden moduuliarvot ovat em. tavalla korjattuja arvoja. Vaikka tulokseksi saadut dynaamisen kimmomoduulin arvot ovat todellista pienemmät, ovat tulokset kuitenkin keskenään vertailukelpoisia.

Tarkempia tuloksia varten pystysiirtymän mittaus tulisi suorittaa näytteen kyljestä siirtymäanturilla, jolloin laitteiston kokeen aikaiset siirtymät eivät vaikuta tuloksiin. Nykyisellä geotekniikan laboratorion mittauslaitteistolla 100 mm halkaisijaltaan olevien näytteiden pystysiirtymän mittausta näytteen kyljestä ei kuitenkaan voitu suorittaa näytesellin ahtaudesta johtuen.

Taulukko 1: Tutkimusmateriaaleille dynaamisten kolmiaksaalikokeiden tuloksista lasketut materiaaliparametrit K1 ja K2, suoritettujen regressiosovitusten selitysasteet sekä dynaamiset kimmomoduulit eri pääjännitysten summien arvoilla.

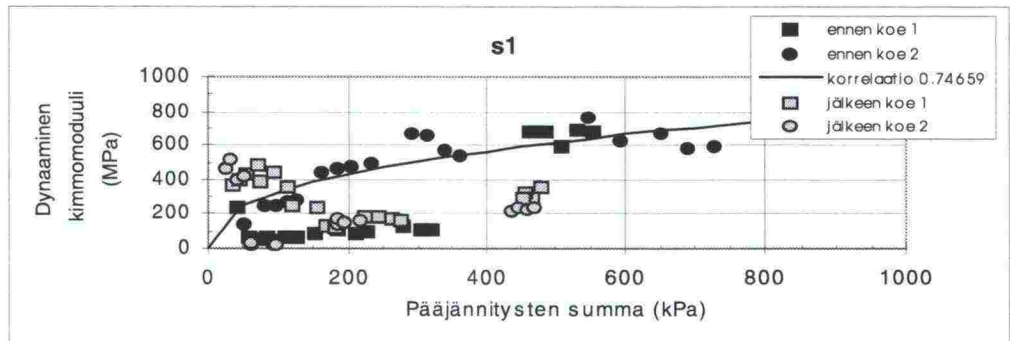
Materiaali	K1	K2	R ²	Dynaaminen kimmomoduuli (MPa)		
				$\theta = 50 \text{ kPa}$	$\theta = 100 \text{ kPa}$	$\theta = 150 \text{ kPa}$
s1 ennen*	3,273	0,393	0,74659	249	327	384
s1 jälkeen	-	-	-	-	-	-
m1 ennen	10,637	0,401	0,57184	806	1064	1252
m1 jälkeen	7,441	0,491	0,61114	529	744	908
m2 ennen	12,735	0,460	0,84927	926	1274	1535
m2 jälkeen	6,029	0,833	0,87545	338	603	845
m3 ennen	4,755	0,565	0,66990	321	476	598
m3 jälkeen	3,430	0,783	0,87576	199	343	471
m4 ennen	6,436	0,727	0,56505	389	644	864
m4 jälkeen	6,407	0,578	0,65036	429	641	810
M1 ennen	-	-	-	-	-	-
M1 jälkeen	166,34	0,280	0,10859	13700	16634	18634
M2 ennen	-	-	-	-	-	-
M2 jälkeen	239,65	0,266	0,05765	19930	23965	26694
M3 ennen	-	-	-	-	-	-
M3 jälkeen	161,75	0,600	0,43956	10672	16175	20630
M4 ennen	-	-	-	-	-	-
M4 jälkeen	106,35	0,431	0,29097	7888	10635	12666
M5 ennen	88,153	0,335	0,16906	6989	88153	10098
M5 jälkeen	60,638	0,678	0,75519	3790	60638	7982

* Laskenta suoritettu vain yhdestä kokeesta.

Materiaalin s1 dynaamisen kimmomoduulin mittaustuloksissa oli huomattavasti hajontaa (Kuva 28). 28 vuorokauden lujittumisjakson jälkeen suorituissa mittauksissa saatiin kokeessa 2 dynaamisen kimmomoduulin arvoiksi selvästi suurempia arvoja kuin kokeessa 1. Syynä tähän voivat olla sideaineen epätasainen jakautuminen näytteessä tai näytteen 1 murtuminen ennen koetta.

Jäädytys-sulatuskokeen aikana stabiloidut savinäytteet laajenivat pituussuunnassa ja niiden vesipitoisuus kasvoi noin 10 %-yksikköä, mikä heikensi näytteisiin muodostuneiden sementtisidosten lujuutta. Kokeen jälkeen suoritettussa dynaamisessa kolmiaksaalikokeessa molemmilla näytteillä mitattiin aluksi suhteellisen hyviä kimmomoduulin arvoja. Dynaamisen kolmiaksaalikokeen edetessä stabiloiduissa näytteissä vielä jäljellä olevat sidokset ilmeisesti murtuivat, jolloin koekappaleiden kimmomoduulin arvo lähestyi sitomattoman saven kimmomoduuli-arvoja. Kuormituksen jatkuessa näytteistä poistui vettä ja ne tiivistyivät, jonka johdosta kimmomoduulin arvo uudelleen hieman parantui.

Tulosten perusteella materialin s1 kimmomoduulin sovituskäyrä laskettiin ennen jäädytys-sulatuskoetta vain kokeelle 2. Jäädytys-sulatuskokeen läpikäyneille näytteille sovituskäyrää ei voitu laskea. Em. käyttäytymisen perusteella materiaalin jäätymis-sulamiskestävyyttä ko. sementtipitoisuudella voidaan pitää kimmomoduulin osalta riittämättömänä. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin muissakin kokeissa.



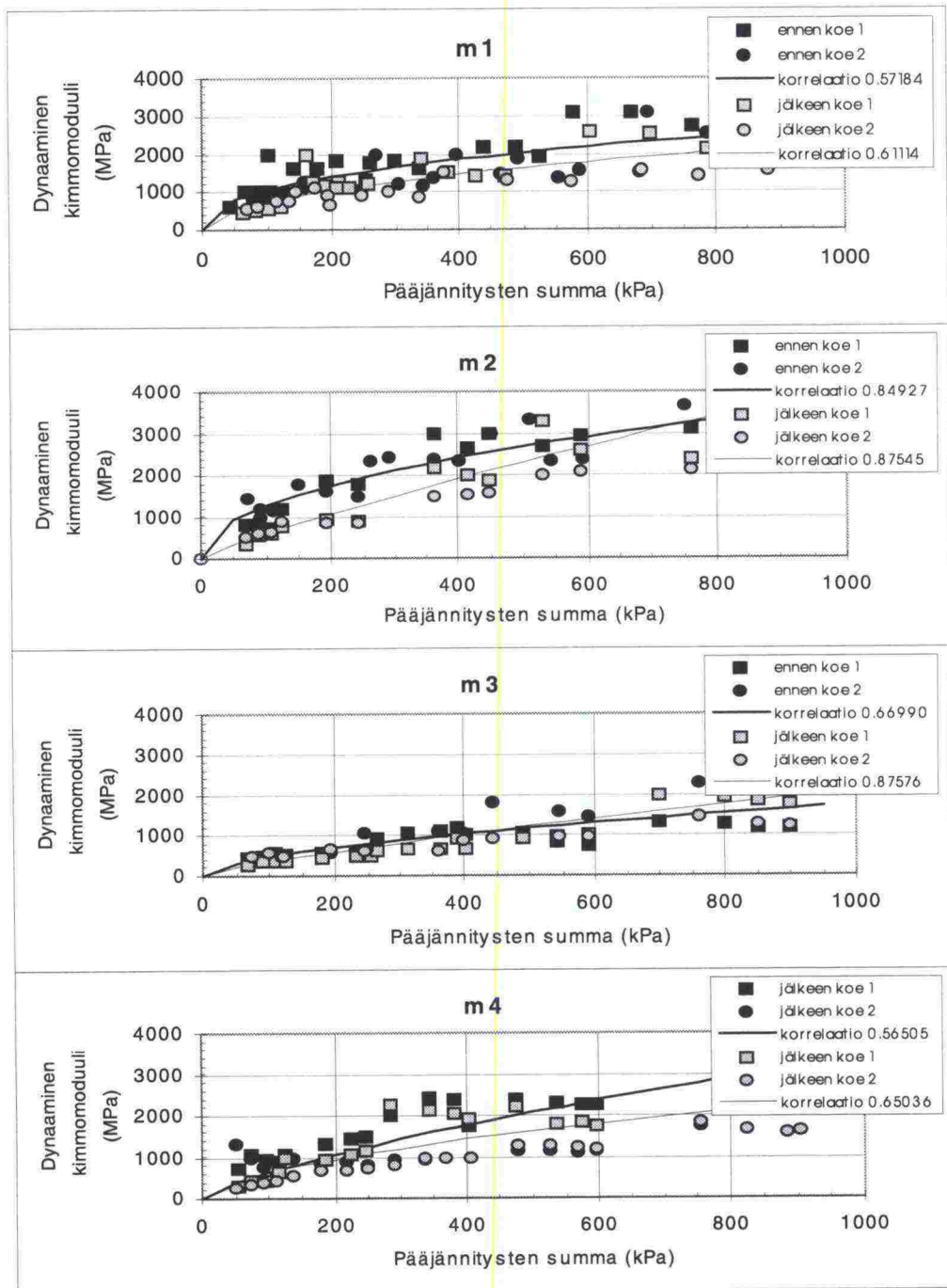
Kuva 28: Materiaalin s1 dynaamiset kimmomoduulit pääjännitysten summan funktiona ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen sekä kaavan 4 mukaan laskettu sovituskäyrä ennen jäädytys-sulatuskoetta suoritettulle kokeelle 2.

Stabiloiduilla moreeneilla odotetusti paras kimmomoduulin arvo saatiin rakeisuudeltaan Sementtistabilointiohjeen / 12/ ohjealueen mukaisilla materiaaleilla m1 ja m2 (Kuva 29). Heikoin tulos saatiin materiaalilla m3, jonka hienoaines- ja vesipitoisuudet olivat tutkittavista moreeneista suurimmat.

Jäädytys-sulatussykliä vaikutus kimmomoduuliin näkyy selvästi materiaaleilla m1 ja m2, joiden sementtipitoisuus on Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaista vähimmäisementtipitoisuutta alhaisempi. Materiaalin m2 dynaaminen kimmomoduuli jäädytys-sulatuskokeen jälkeen on jopa alle puolet ennen koetta mitatusta kimmomoduulin arvosta. Sementtipitoisuuden lisäksi kimmomoduulin heikkeneminen jäädytys-sulatuskokeen aikana näyttäisi riippuvan näytteiden hienoaines- ja vesipitoisuudesta. Materiaalin m2 vesipitoisuus kasvoi jäädytys-sulatuskokeen aikana enemmän kuin materiaalilla m1 lähinnä suuremman kapillaarisen nousukorkeuden sekä vedenadsorptiokyvyn johdosta. Todennäköisesti molemmilla materiaaleilla olisi päästy muiden kokeiden tapaan parempaan lopputulokseen sekä kimmomoduulin tason että sen jäätymis-sulamiskestävyyden osalta, mikäli käytetty sementtipitoisuus olisi ollut suurempi.

Materiaaleilla m3 ja m4 sementtipitoisuus oli vähimmäispitoisuutta suurempi. Materiaalien suuresta hienoainespitoisuudesta johtuen saavutetut dynaamisen kimmomoduulin arvot ovat kuitenkin selvästi pienempiä kuin materiaaleilla m1 ja m2. Hienoainespitoisimmasta materiaalista m3 valmistetut näytteet imivät jäädytys-sulatuskokeen aikana lisävettä moreeninäytteistä eniten (n. 7-8 %-yksikköä), mikä heikensi tuloksia entisestään. Sen sijaan materiaalin m4 dynaamiseen kimmomoduuliin pääjännityksen arvoilla 0-200 kPa ei jäädytys-sulatussykleillä juurikaan ollut vaikutusta. Toisaalta, vaikka erot

korrelaatiokäyrien välillä ovat pienet, on hajonta materiaalin m4 yksittäisten kokeiden välillä huomattavaa, mikä viittaa sementin epätasaiseen jakautumiseen näytteissä.



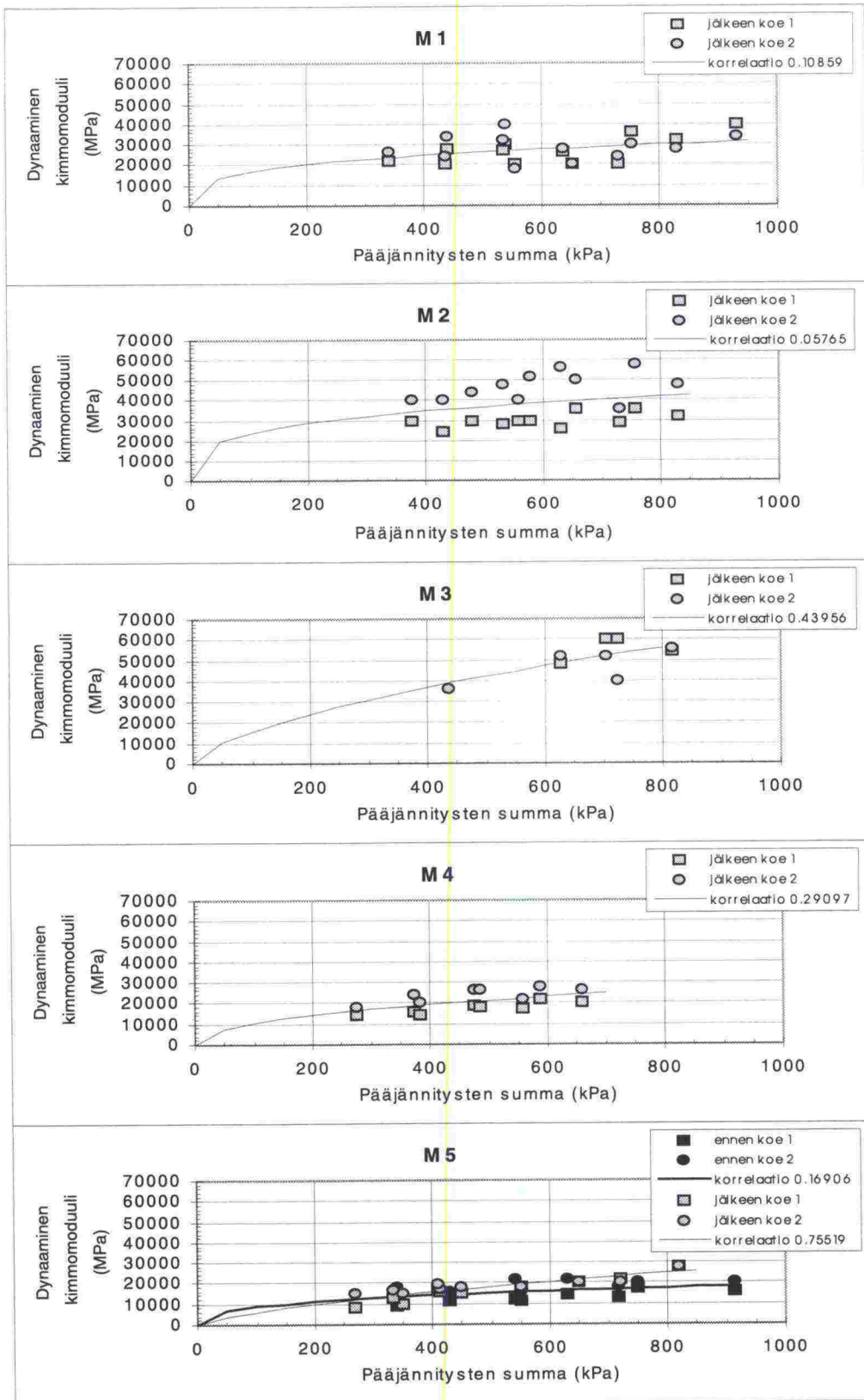
Kuva 29: Materiaalien m1, m2, m3 ja m4 dynaamiset kimmomoduulit pääjännitysten summan funktiona ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen sekä kaavan 4 mukaan mittaustuloksista lasketut sovituskäyrät. Sovituskäyrää kimmomoduulille ennen jäädytys-sulatussyklejä kuvaa paksumpi viiva.

Stabiloitujen kalliomurskeiden dynaamisen kimmomoduulin määrittäminen epäonnistui neljän ensimmäisen kokeen osalta (M1-M4 28 vrk). Kokeissa pys-

tyysiirtymä mitattiin sellin päältä kuten edellä, mutta isompaa näyteselliä käytettäessä kuormituksen aiheuttamat laitteiston liikkeet kasvoivat liian suuriksi, jotta tuloksia olisi voinut pitää edes suuntaa antavina. Mittausvirhetä lisäsi kuormitusakselin ohjaimen kuluminen, jolloin akseli ja sen mukana akseliin kiinnitetty pystysiirtymäanturi pääsivät heilumaan.

Tilanteen korjaamiseksi jäljellä olevissa kokeissa pystysiirtymän mittaus suoritettiin näytteen keskimmäisestä kolmanneksesta vastakkaisille sivuille magneetin avulla kiinnitetyillä pystysiirtymäantureilla. Ko. tavalla eliminointiin laitteiston aiheuttama virhe pystysiirtymään. Tuloksia tarkasteltaessa nähdään, että joillakin näytteillä vastakkaisilta sivuilta mitatut arvot poikkesivat toisistaan (Taulukko 1, Kuva 30). Ilmeisimmät syyt ovat kuormituksen epätasainen jakautuminen näytteessä sekä näytteiden lajittuminen koekappaleiden valmistuksen yhteydessä. Kuormituksen tasaisen jakautumisen varmistamiseksi näytteiden päät tasoitettiin ennen koestamista, mutta näytteiden suuresta koosta johtuen täysin sileän ja suoran pinnan aikaansaaminen oli mahdotonta. Lajittumista tapahtui kaikilla kalliomurskeilla koekappaleiden valmistuksen yhteydessä. Selkeintä lajittuminen oli materiaalilla M4, jolla suuri osa hienoaineksen ja sementin muodostamasta massasta valui koekappaleen tiivistyksen yhteydessä kappaleen alaosaan yläosan jäädessä selvästi alaosa karkearakeisemmaksi. Lajittumisen johdosta koekappaleet muuttuvat epähomogeenisiksi, jolloin myös kuormitus vaikuttaa näytteen eri kohdissa eri tavalla.

Kalliomurskeiden dynaamiset kimmomoduulit vastasivat Sementtistabilointiohjeen / 12/ asemasekoitetun maabetonin E-moduuliarvoja jäädytys-sulatuskokeen jälkeenkin. Tulokset olivat myös samaa luokkaa kuin kappaleessa 4.3.4 lasketut E-moduulit. Mitatut arvot olivat huomattavasti suuremmat kuin moreeneilla ja savella, vaikkakaan tulokset eivät ole keskenään verrannolliset erilaisen mittausmenetelmän vuoksi. Heikoin kimmomoduuli oli materiaalilla M5 ja paras materiaalilla M2. Pienimmillään mitatut kimmomoduulit olivat hieman alle 10000 MPa ja suurimmillaan jopa 60000 MPa pääjännityksen tasosta riippuen. Jäädytys-sulatussykliä vaikutusta kimmomoduuliin voitiin selvittää vain materiaalilla M5, joka oli kalliomurskeista hienoainespitoisin. Esimerkiksi pääjännityksen arvolla 100 kPa materiaalin M5 kimmomoduuli aleni jäädytys-sulatussykliä aikana noin 30 % sovituskäyrien perusteella laskettuna. Sovituskäyrät korreloivat kuitenkin huonosti mittaus-tulosten kanssa. Mittauspisteitä tarkasteltaessa tulos on päinvastainen eli jäädytys-sulatuskokeen jälkeen kimmomoduuli on ollut suurempi kuin 28 vuorokauden ikäisellä näytteellä. Ilmeisesti jäädytys-sulatussykleillä ei ole vaikutusta materiaalin M5 kimmomoduuliin.

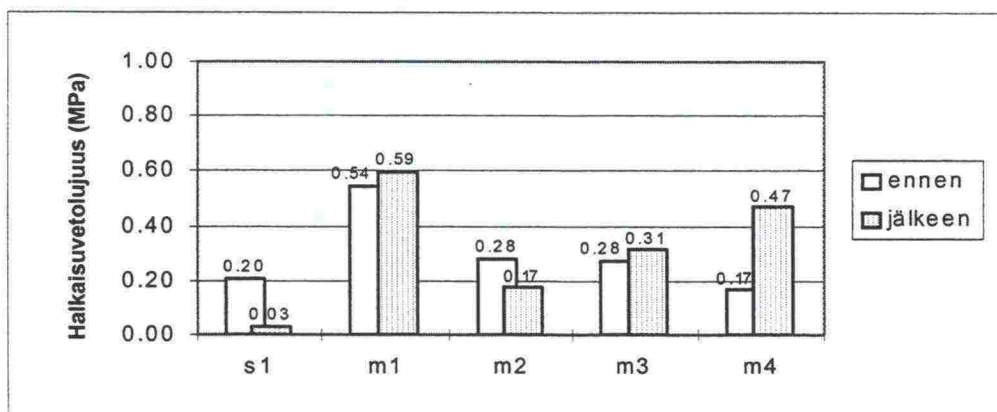


Kuva 30: Materiaalien M1, M2, M3, M4 ja M5 dynaamiset kimmomoduulit pääjännitysten summan funktiona ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen sekä kaavan 4 mukaan mittaustuloksista lasketut sovituskäyrät. Sovituskäyrää kimmomoduulille ennen jäädytys-sulatussyklejä kuvaa paksumpi viiva.

5.3.6 Halkaisuvetolujuus

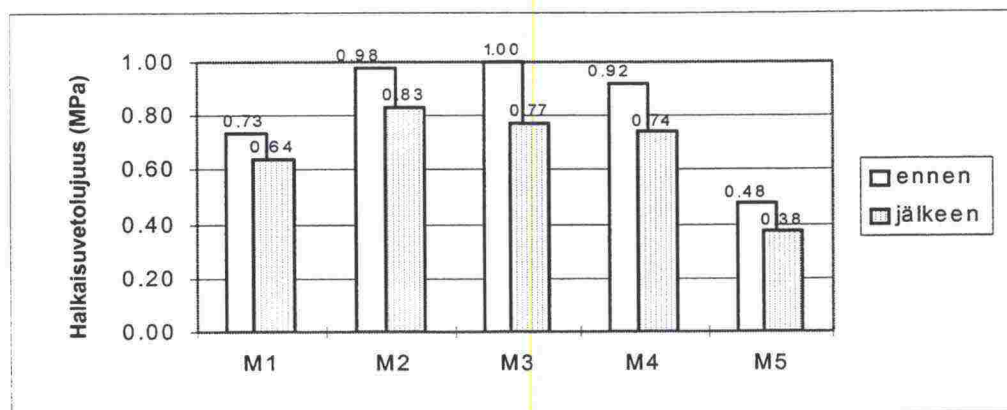
Materiaalin s1 halkaisuvetolujuus ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen määritettiin sideainepitoisuudella 8 % (Kuva 31). Halkaisuvetolujuudet on laskettu kahden rinnakkaismäärityksen keskiarvona. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteellä 6. Tuloksista nähdään, että materiaalin s1 halkaisuvetolujuus hävisi miltei kokonaan jäädytys-sulatussykliä aikana. Todennäköisesti koekappale olisi hajonnut jäädytys-sulatuskokeen aikana (vrt. pituuden muutos), elleivät ympärillä olevat kuoret olisi tukeneet kappaletta. Materiaalin s1 halkaisuvetolujuuden arvo ei ole suoraan verrattavissa muiden materiaalien tuloksiin, koska näytteiden halkaisu suoritettiin eri nopeudella.

Stabiloitujen moreenikappaleiden halkaisuvetolujuudet on esitetty kuvassa 31. Materiaaleilla m1 ja m2 sementtipitoisuus oli 2,5 % ja materiaaleilla m3 ja m4 7 %. Halkaisuvetolujuudet on laskettu kahden rinnakkaismäärityksen keskiarvona, paitsi materiaalilla m1 jäädytys-sulatuskokeen jälkeen ja materiaaleilla m3 ja m4 ennen jäädytys-sulatuskoetta, joilla rinnakkaisten koekappaleiden koestamiset epäonnistuivat. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteellä 6. Moreeneilla ei ole havaittavissa yhtenäistä käyttäytymistä halkaisuvetolujuuden suhteen. Puuttuvien koekappaleiden lisäksi tulosten arviointia vaikeuttavat suhteellisen suuret vaihtelut tuloksissa. Myöskään koekappaleiden valmistustapa ei varmastikaan ole paras mahdollinen, joten tuloksiin tulee suhtautua kriittisesti.



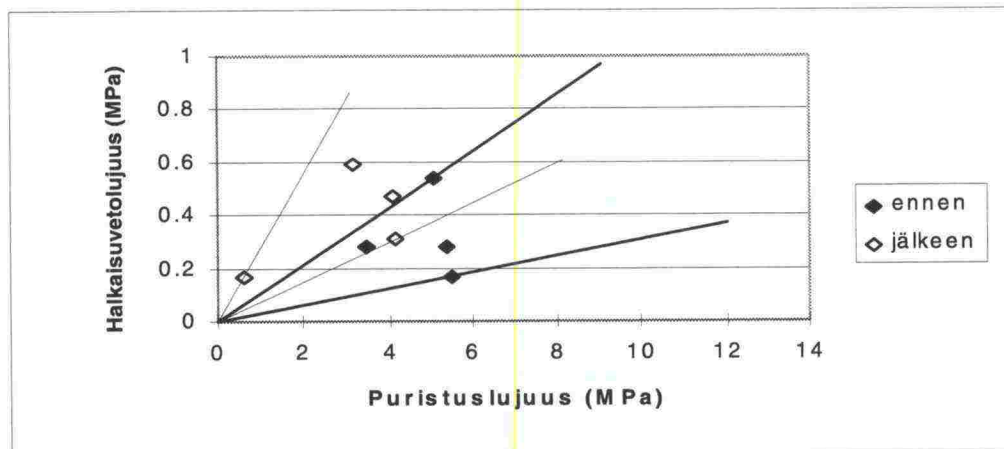
Kuva 31: Koekappaleiden halkaisuvetolujuudet ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen materiaaleille s1, m1, m2, m3 ja m4.

Halkaisuvetokoekappaleilla käytettiin kalliomurskemassoilla sementtipitoisuutta 5 %. Kalliomurskeiden halkaisuvetolujuus aleni jäädytys-sulatuskokeen aikana 12...24 % (Kuva 32). Halkaisuvetolujuudet on laskettu kahden rinnakkaismäärityksen keskiarvona. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteellä 6.

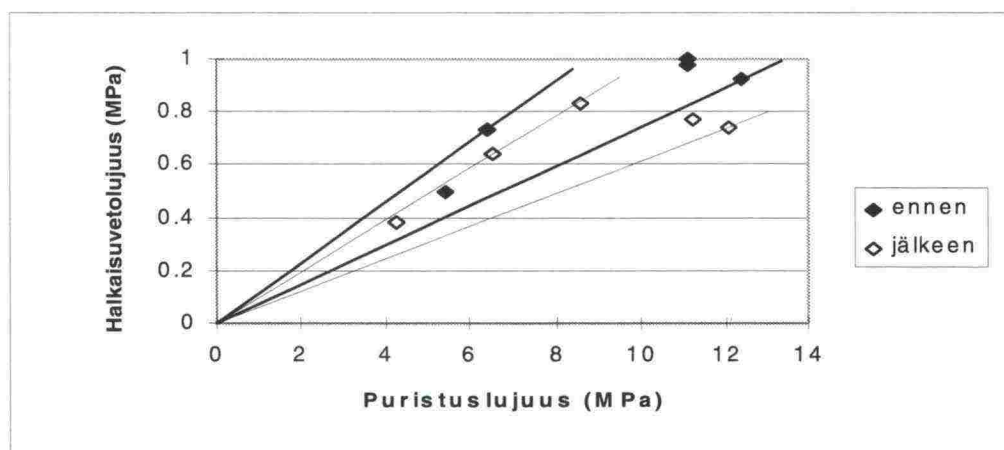


Kuva 32: Koekappaleiden halkaisuvetojuudet ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen materiaaleille M1, M2, M3, M4 ja M5.

Halkaisuvetokokeen ja puristuskokeen tulosten välistä riippuvuutta ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen tutkittiin vertaamalla samalla sementtipitoisuudella valmistettujen koekappaleiden tuloksia keskenään. Pisteet sijoitettiin xy-koordinaatistoon, johon piirrettiin myös suorat, joiden väliin pisteet asettuivat. Moreenien osalta tulokset on esitetty kuvassa 33 ja kalliomurskeiden osalta kuvassa 34. Kuvissa paksummat suorat rajaavat ennen jäädytys-sulatuskoetta määritetyistä lujuuksista lasketut pisteet ja ohuemmat suorat jäädytys-sulatuskokeen jälkeisistä tuloksista lasketut pisteet. Moreeneilla halkaisuvetojuuden ja puristusvetolujuuden välinen suhde ennen jäädytys-sulatuskoetta vaihteli välillä 0,03...0,11 ja kokeen jälkeen välillä 0,07...0,28. Kalliomurskeilla vastaavat luvut olivat 0,07...0,11 ja 0,06...0,10 eli hajonta oli selvästi pienempää. Kalliomurskeiden osalta voidaan sanoa halkaisuvetojuuden olevan keskimäärin hieman alle 10 % puristuslujuudesta. Sama pätee myös moreeneille ennen jäädytys-sulatuskoetta sekä materiaaleille m3 ja m4, joiden sementtipitoisuus ylittää Sementtistabilointiohjeen / 12/ alarajan, myös jäädytys-sulatuskokeen jälkeen.



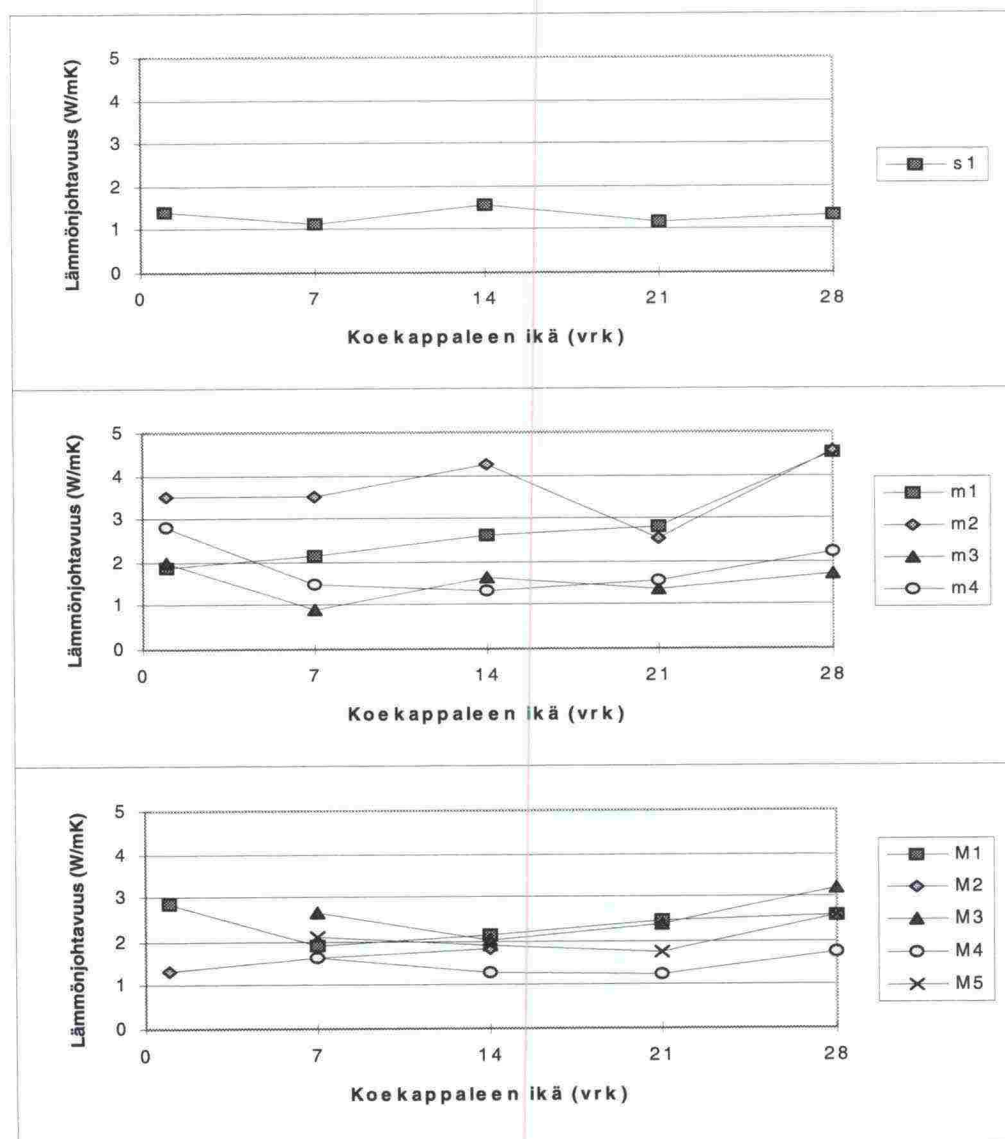
Kuva 33: Puristuslujuuden ja halkaisuvetojuuden välinen riippuvuus ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen materiaaleilla m1, m2, m3 ja m4.



Kuva 34: Puristuslujuuden ja halkaisuvetolujuuden välinen riippuvuus ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen materiaaleilla M1, M2, M3, M4 ja M5.

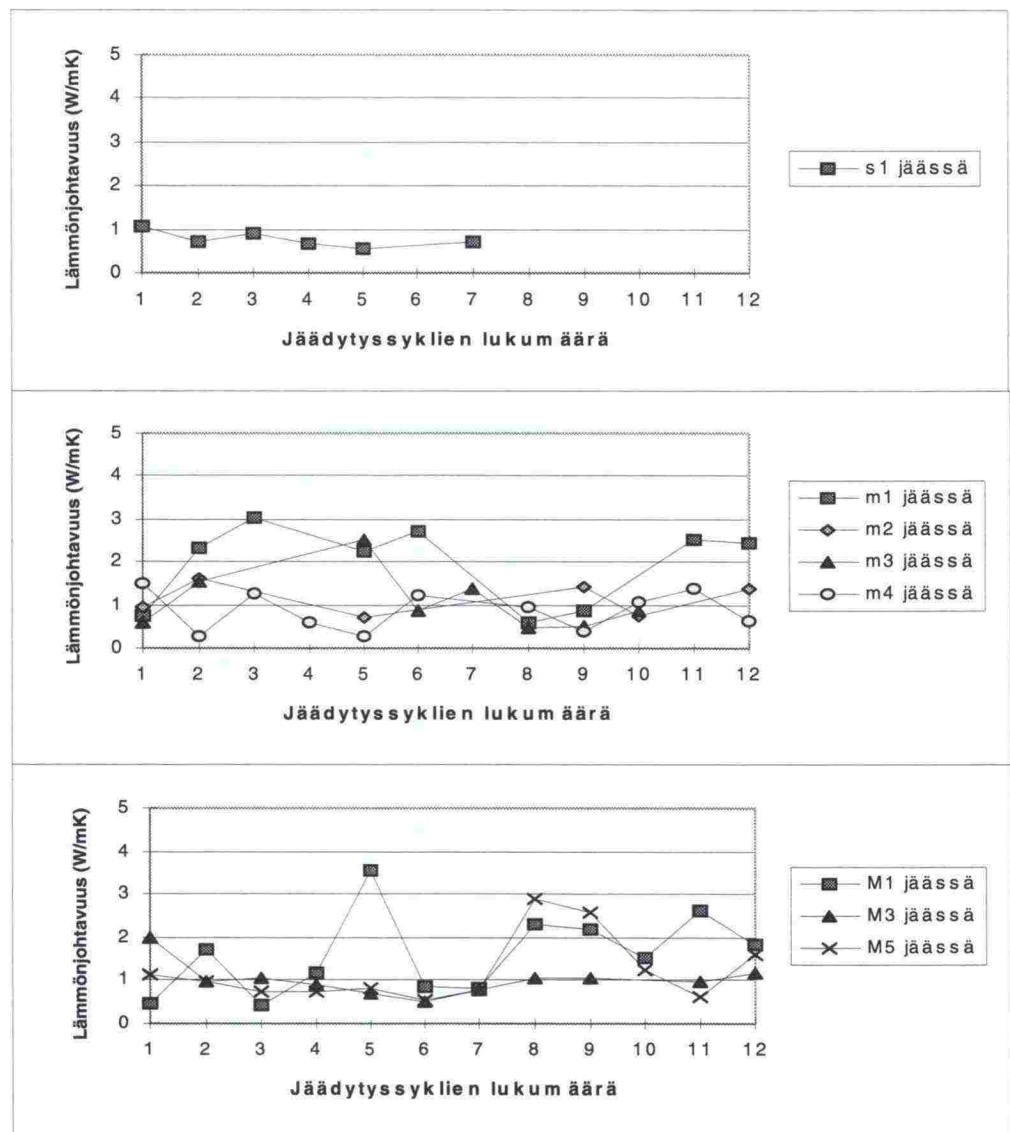
5.3.7 Lämmönjohtavuus

Tutkittujen materiaalien sulan tilan lämmönjohtavuus oli yli 1 W/mK eli ne eivät toimi tierakenteessa eristeenä. Lujittumisjakson aikana lämmönjohtavuudet alenivat veden sitoutuessa sementin kanssa. Lujittumisjakson loppua kohden lämmönjohtavuudet näyttäisivät taas kasvavan. Kalliomurskekappaleisiin upotetut lämmönjohtosondit vaurioituivat koekappaleiden valmistuksen yhteydessä, joten kaikkia mittauksia ei onnistuttu suorittamaan sondien toimintahäiriöiden vuoksi. Materiaaleilla M2 ja M4 sondit rikkoutuivat kokonaan mittausjakson aikana. Stabiloitujen tutkimusmateriaalien lämmönjohtavuuden kehitys lujittumisjakson (28 vrk) aikana keskimmaisella sideainepitoisuudella on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35: Stabiloitujen tutkimusmateriaalien sulan tilan (+22 °C) lämmönjohtavuuden kehitys lujittumisjakson (28 d) aikana.

Jäätäneen tilan (-17,5 °C) lämmönjohtavuudet olivat sulan tilan (+22 °C) lämmönjohtavuuksia pienemmät (Kuva 36). Osa materiaaleista toimisi tierakenteessa jopa eristävänä kerroksena. Jäädytys-sulatuskokeen aikana lämmönjohtavuudet mitattiin vain jäätäneessä tilassa, koska koeappaleiden lämpötilat eivät sulatusjakson aikana ehtineet tasaantua. Lämpövirtaukset mitattavassa materiaalissa vääristävät lämmönjohtavuuden mittaustuloksia. Jäädytys-sulatuskokeen aikana lämmönjohtavuudet vaihtelivat huomattavasti, mutta selvää trendiä ei käyttäytymisessä ole havaittavissa.



Kuva 36: Stabiloitujen tutkimusmateriaalien jäätyneen tilan (-17,5 °C) lämmönjohtavuuden kehitys jäädätyssulatuskokeen aikana.

5.3.8 Vesipitoisuus

Stabiloiduista savikoekappaleista määritettiin vesipitoisuus 28 vuorokauden lujittumisjakson jälkeen sekä jäädätyssulatuskokeen jälkeen (Taulukko 2). Jäädätyssulatuskokeen jälkeen vesipitoisuus voitiin määrittää vain sementtipitoisuudella 12 % valmistetusta kappaleesta muilla sementtipitoisuuksilla valmistettujen koekappaleiden hajotessa ennen kokeen päättymistä. Sementtipitoisuudella 12 % valmistetun koekappaleen vesipitoisuus jäädätyssulatuskokeen jälkeen oli sama kuin ennen koetta eli ko. materiaali ei ollut absorboinut itseensä vettä kokeen aikana. Kokeen aikana hajonneiden kappaleiden vesipitoisuus hajoamishetkellä oli sementtipitoisuudella 4 % keskimäärin 67,4 % ja sementtipitoisuudella 8 % keskimäärin 54,4 %. Vaikka vesipitoisuuden määrittäminen tehtiin pääasiassa yhdestä näytteestä, eivätkä tu-

lokset siten ole täysin luotettavia, näyttäisi siltä, että sementin lisäys pienentää massan absorboiman veden määrää.

Stabiloiduilla moreenimateriaaleilla jäädytys-sulatuskokeen aikana absorboituneen veden määrä oli sitä suurempi mitä enemmän runkoaineessa oli hienoaainesta (*Taulukko 2*). Hienoainespitoisimmat koekappaleet kyllästyivät täysin kokeen aikana. Sementin lisäys kuitenkin pienensi absorboituneen veden määrää.

Stabiloidut kalliomurskeet eivät juurikaan absorboineet vettä jäädytys-sulatussykliä aikana (*Taulukko 2*). Osalla materiaaleista vesipitoisuus näyttäisi jopa pienentyneen kokeen aikana. Poikkeuksena olivat materiaalit M1 sementtipitoisuudella 5 % ja M5 sementtipitoisuudella 3 %, joiden vesipitoisuus on kasvanut kokeen aikana selvästi. Mitään selkeää syytä ko. näytteiden käyttäytymiselle ei ole olemassa, joten luultavasti kappaleiden valmistuksessa käytetty runkoaine on lajittunut ja ko. kappaleissa on muita enemmän hienoaainesta. Myöskään kalliomurskeiden kyllästysasteiden muutoksessa kokeen aikana ei ole havaittavissa johdonmukaista käyttäytymistä. Suurimmalla osalla kalliomurskeista kyllästysasteet ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen vaihtelivat noin 60 ja 70 %:n välillä. Verrattaessa kalliomurskeiden kyllästysvesipitoisuuksia valmistusvesipitoisuuteen 4,5 % nähdään, että valmistusvaiheessa useimmat massat ovat olleet lähellä kyllästyntä tilaa. Todellisuudessa tierakenteessa olisi mahdotonta saavuttaa näin suurta kyllästysastetta massan tiivistysvaiheessa.

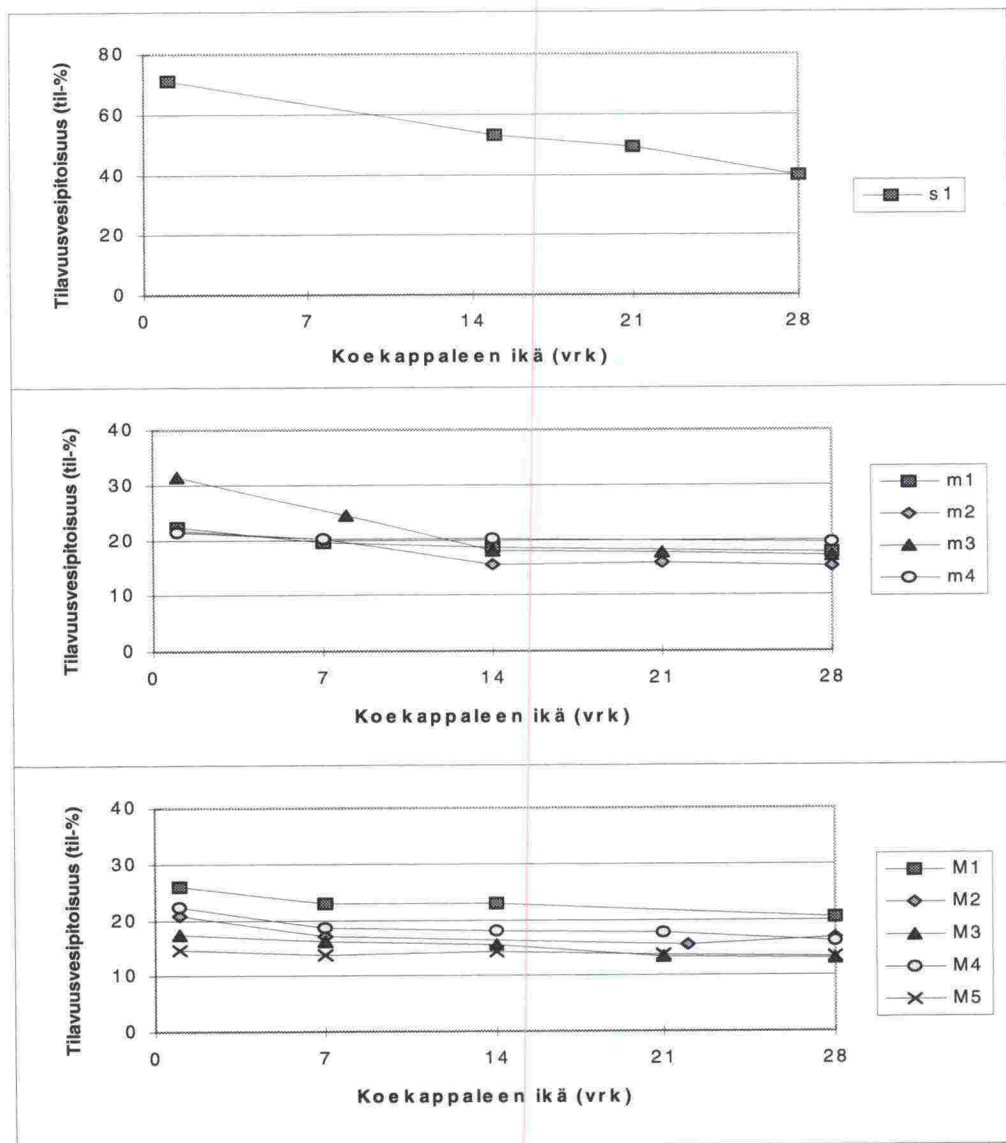
Taulukko 2: Koekappaleiden vesi- ja kyllästysvesipitoisuudet sekä niistä lasketut kyllästysasteet ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen.

Materiaali	Sem. pit (%)	w ennen (%)	w _{kyll} ennen (%)	kyll. aste ennen (%)	w jälkeen (%)	w _{kyll} jäl- keen (%)	kyll. aste jälkeen (%)
s1	4	53,0	47,7	111,1	-	-	-
	8	50,0	46,7	107,1	-	-	-
	12	44,3	42,3	104,7	44,3	43,0	103,0
m1	1,5	4,5	5,9	76,3	7,2	-	-
	2,5	4,6	6,3	73,0	7,0	-	-
	4,5	4,2	7,7	54,6	5,5	6,9	79,7
m2	1,5	4,4	8,8	50,0	-	-	-
	2,5	4,8	8,7	55,2	10,4	10,2	102,0
	4,5	4,6	8,9	51,7	9,1	9,4	96,8
m3	5	5,1	12,4	41,1	11,9	12,1	98,4
	7	4,9	12,7	38,58	13,2	12,9	102,3
	9	5,3	13	40,8	12,8	12,6	101,6
m4	5	4,9	6,8	72,1	11,7	9,6	121,9
	7	4,9	9,1	53,9	12	9,2	130,4
	9	5,2	9,5	54,7	9,2	7,6	121,1
M1	3	3,5	4,5	77,8	3,0	4,5	66,7
	5	3,2	4,3	74,4	5,6	5,6	100,0
	7	3,0	5,6	53,6	4,1	5,8	70,7
M2	3	3,3	4,6	71,7	3,6	5,3	67,9
	5	3,6	5,2	69,2	3,0	4,7	63,8
	7	3,2	5,1	62,8	3,2	4,9	65,3
M3	3	3,3	4,5	73,3	3,6	5,2	69,2
	5	3,2	3,9	82,1	3,3	4,4	75
	7	2,9	4,0	72,5	3,1	4,2	73,8
M4	3	3,3	4,6	71,7	2,9	4,1	70,7
	5	3,2	5,0	64,0	3,0	4,3	69,8
	7	2,8	4,1	68,3	2,9	4,3	67,44
M5	3	2,2	5,6	39,3	5,7	6,4	89,1
	5	3,3	5,5	60,0	3,2	4,9	65,3
	7	3,1	5,6	55,4	3,6	5,7	63,2

- koekappale särkynyt, ei tulosta

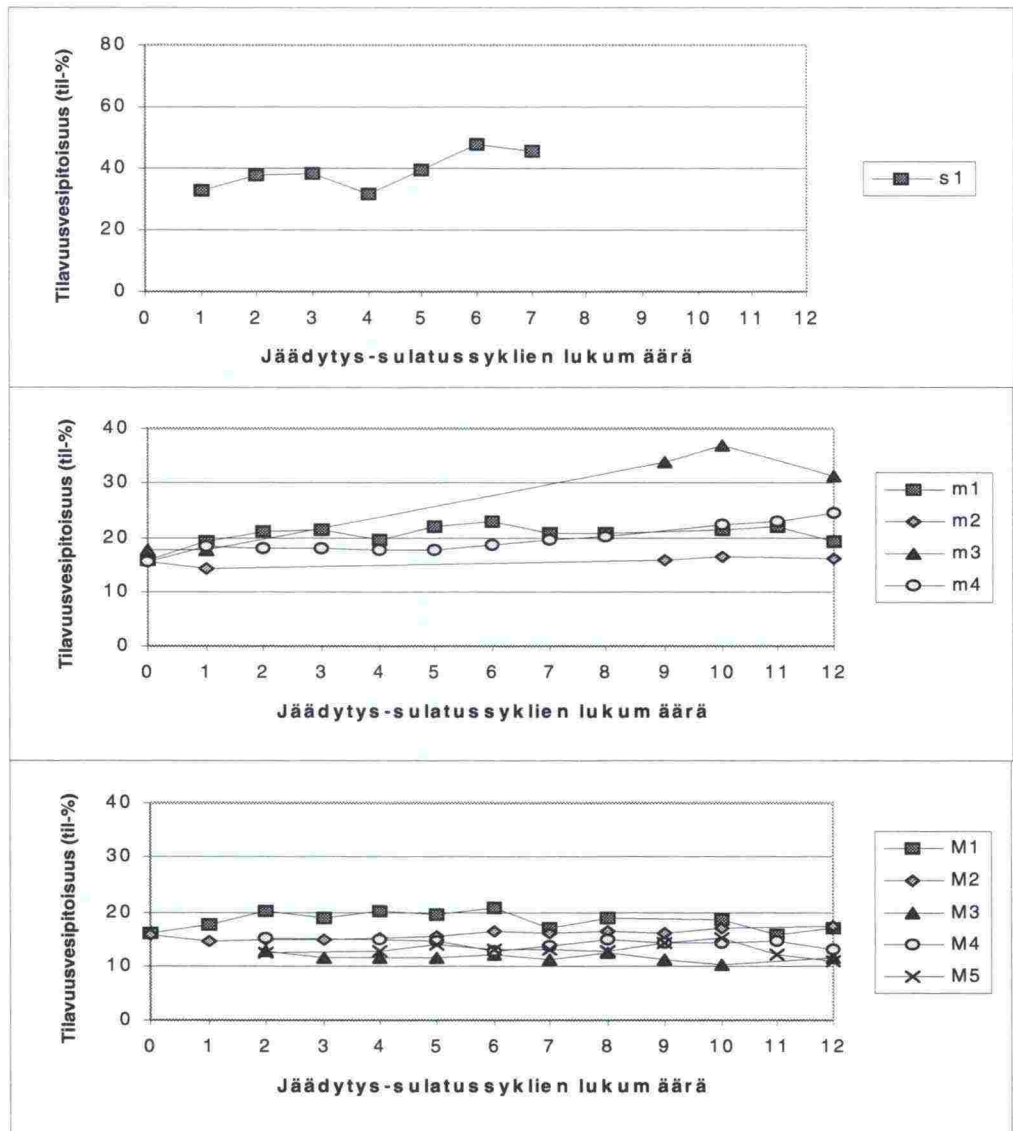
Kustakin materiaalista keskimmaisella sideainepitoisuudella valmistetusta koekappaleesta seurattiin tilavuusvesipitoisuutta sekä lujittumisjakson (Kuva 37) että jäädytys-sulatussykliä aikana (Kuva 38). Tilavuusvesipitoisuuksia laskettaessa ei ole huomioitu koekappaleiden sisältämän veden määrää, vaan laskennassa on käytetty maa-aineksen kalibrointikertoimia. Tästä johdettujen saadut arvot voivat hieman poiketa todellisista tilavuusvesipitoisuuden arvoista.

28 vuorokauden lujittumisjakson aikana tilavuusvesipitoisuus pieneni kaikilla materiaaleilla veden sitoutuessa sementin kanssa.



Kuva 37: Stabiloitujen tutkimusmateriaalien tilavuusvesipitoisuuden kehitys lujuutumisjakson (28 vrk) aikana.

Runkoaineeltaan Sementtistabilointiohjeen / 12/ ohjealuetta hienorakeisempien materiaalien tilavuusvesipitoisuus kasvoi jäädytys-sulatussyklien aikana. Muilla materiaaleilla tilavuusvesipitoisuus pysyi lähes samana koko kokeen ajan. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin edellä. Kuvassa 38 jäädytys-sulatussyklien lukumäärä 0 tarkoittaa tilannetta kokeen alussa, kun koekappale on ollut 4 tuntia kapillaarimatolla, ja syklien lukumäärä 12 tilannetta kokeen jälkeen, kun koekappaleet ovat sulaneet 1 vuorokauden. Stabiloidulla savella koekappale, josta tilavuusvesipitoisuuden mittausta suoritettiin, hajosi 7. syklin jälkeen.



Kuva 38: Stabiloitujen tutkimusmateriaalien tilavuusvesipitoisuuden kehitys jäädytys-sulatuskokeen aikana.

Jäädytys-sulatuskokeen jälkeen kuivattujen koekappaleiden tilavuusvesipitoisuus oli lähes kaikilla materiaaleilla noin 6-7 til-%. Materiaalin M2 tilavuusvesipitoisuus kuivana oli muita suurempi ja materiaalin M3 muita pienempi, mikä ilmeisesti johtuu hienoaineksen hydraulisista ominaisuuksista. Samat materiaalit edustavat kalliomurskeilla ääripäitä myös kyllästyneessä tilassa mitatuilla vesipitoisuuksilla. Kun verrataan tuloksia koekappaleista aikaisemmin mitattuihin tilavuusvesipitoisuuksiin, nähdään kuten aiemminkin, että moreeni- ja kalliomurskemassat ovat koekappaleiden valmistusvaiheessa olleet lähellä kyllästynyttä tilaa.

Taulukko 3: Stabiloitujen tutkimusmateriaalien tilavuusvesipitoisuudet jäädytys-sulatuskokeen jälkeen kuivana ja kyllästyneenä.

Materiaali	Tilavuusvesipitoisuus (til-%)	
	Kuiva	Kyllästynyt
m1	6,1	25,7
m2	5,8	22,0
m3	7,3	30,9
m4	6,4	22,4
M1	6,5	26,3
M2	8,6	26,4
M3	3,8	13,0
M4	7,1	15,6
M5	6,3	21,2

5.3.9 Huokoisuus

Koekappaleiden huokoisuudet määritettiin kaikilla sideainepitoisuuksilla vesipitoisuuden määrittämiseen käytetyistä koekappaleista ennen jäädytys-sulatuskoetta sekä sen jälkeen, mikäli kappale oli säilynyt ehjänä kokeen läpi. Tuloksista (*Taulukko 4*) nähdään, että koekappaleiden huokoisuudet kasvoivat runkoaineen hienoainespitoisuuden kasvaessa. Materiaalilla m1 sekä kaikilla kalliomurskeilla koekappaleiden huokoisuus oli maabetonille tyypillinen n. 10-15 %. Materiaaleilla, joiden hienoainespitoisuus oli Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaisen rakeisuusalueen ylärajalla tai sen yli, huokoisuudet olivat suurempia. Jäädytys-sulatuskokeen aikana huokoisuudet eivät juurikaan muuttuneet, suurimmillaan muutokset olivat muutaman prosenttiyksikön verran. Tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioda se, että huokoisuudet määritettiin jäädytys-sulatuskokeen jälkeen vain (lähes) ehjinä säilyneistä koekappaleista. Koekappaleilla, jotka rikkoutuivat kokeen aikana, tilavuuden ja siten myös huokoisuuden kasvu oli selvästi em. suurempaa. Lisäksi kalliomurskeiden todelliset huokoisuudet ovat hieman taulukkoon 4 laskettuja suurempia, sillä punnittaessa vedellä kyllästettyjä koekappaleita ilmassa vesi poistui karkearakeisten murskeiden pintahuokosista. Tällöin koekappaleiden massa kyllästyneenä oli todellista hieman pienempi, mikä pienentää myös laskettua huokoisuutta.

Taulukko 4: Koekappaleiden huokoisuudet ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen.

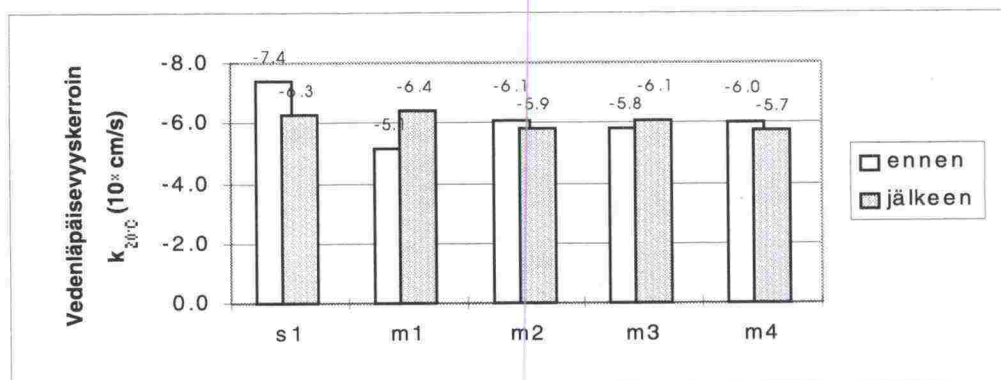
Materiaali	Sementtipitoisuus (%)	Huokoisuus 28 vrk (%)	Huokoisuus jäädytys- sulatuskokeen jälkeen (%)
s1	4	54,7	-
	8	55,1	-
	12	52,3	52,5
m1	1,5	13,0	-
	2,5	13,8	-
	4,5	13,7	14,8
m2	1,5	18,4	-
	2,5	18,2	20,6
	4,5	18,5	19,4
m3	5	24,2	23,7
	7	24,4	24,6
	9	24,9	24,4
m4	5	13,4	19,2
	7	17,4	18,1
	9	18,6	15,4
M1	3	10,8	10,7
	5	10,1	13,0
	7	12,7	13,2
M2	3	11,2	12,6
	5	12,5	11,2
	7	12,1	11,7
M3	3	10,2	11,5
	5	9,1	10,2
	7	9,1	9,7
M4	3	10,8	9,9
	5	12,0	10,3
	7	10,0	10,4
M5	3	12,9	14,4
	5	12,5	11,0
	7	12,8	13,1

5.3.10 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyydet määritettiin savella ja moreeneilla keskimmaisella sideainepitoisuudella. Kuvassa 39 esitetyt tulokset on laskettu kahden koekappaleen keskiarvona vastaamaan vedenläpäisevyyttä lämpötilassa 20 °C. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteellä 7.

Stabiloidun saven vedenläpäisevyys kasvoi jäädytys-sulatuskokeen aikana. Vedenläpäisevyyden kasvu aiheutui näytteen huokostilavuuden kasvusta kokeen aikana sekä sementtilisäyksen aiheuttamasta massan rakeistumisesta. Moreeneilla jäädytys-sulatussykleillä ei ollut suurta vaikutusta veden-

läpäisevyyteen. Stabiloitujen karkearakeisten kalliomurskeiden vedenläpäisevyyksiä ei katsottu aiheelliseksi määrittää, mutta oletettavasti jäädytys-sulatussyklit eivät niin karkearakeisilla materiaaleilla juurikaan vaikuttaisi vedenläpäisevyyteen.



Kuva 39: Vedenläpäisevyyskerroimet ($k_{20^{\circ}\text{C}}$) ennen ja jälkeen jäädytys-sulatuskokeen materiaaleilla s1, m1, m2, m3 ja m4.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa selvitettiin sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyyttä laboratoriotutkimuksin. Tarkasteltavina ominaisuuksina oli stabilointimassan mekaanisia ja fysikaalisia ominaisuuksia sekä tilasuu-reita. Tutkittavina runkoaineina olivat savi, neljä moreenia sekä viisi kallio-mursketta. Sideaineena oli Finnsementti Oy:n yleissementti CEM II A 42,5. Koska nykyiset laatuksiteerit alittavien materiaalien käyttö tienrakennukses-sa tulee tulevaisuudessa lisääntymään, suuri osa tutkimukseen valituista materiaaleista oli sellaisenaan tienrakennukseen sopimattomia materiaaleja. Savella ja osalla moreeneista ongelmana oli hienoaineksen suuri määrä. Kalliomurskeiden rakeisuuskäyrät olivat roikkuvia eli niiden hienoainespitoi-suus oli liian pieni. Lisäksi osalla kalliomurskeista kiviaineksen laatu oli heik-ko.

Vaikka tutkimuksen aineisto oli tämänkaltaiselle selvitykselle tavallista laa-jempi, tulisi tutkimuksia suorittaa huomattavasti enemmän, mikäli jäätymis-sulamiskestävyteen vaikuttavat tekijät haluttaisiin perusteellisesti selvittää. Tulosten perusteella voitiin kuitenkin selvittää jäätymis-sulamissykliin vaikutuksia sementtistabiloinnin eri ominaisuuksiin sekä esittää arvioita koemene-telmien soveltuvuudesta jäätymis-sulamiskestävyuden määrittämiseen.

Tutkimuksen lähtökohtana olivat nykyiset sementtistabilointia koskevat oh-jeet, joiden mukaisesti kullekin runkoaineelle suoritettiin ennakkokokeita. Sementtistabilointiohjeen / 12/ suhteitustaulukon havaittiin antavan karkea-rakeisille kalliomurskeille sopivia, mutta hienorakeisemmille moreeneille liian suuria sementtipitoisuuksia vaadittua lujuustasoa ajatellen. Lisäksi havaittiin, että stabilointiohjeen suosittama ylimääräinen neutraaloiva sementtilisäys humuspitoisille materiaaleille oli tarpeeton. Ennakkokokeiden perusteella valittiin kullekin runkoaineelle kolme sementtipitoisuutta, joita käytettiin jää-tymis-sulamiskestävyyskokeissa.

Jäätymis-sulamiskokeet suoritettiin saksalaisten ohjeiden / 13/ ja / 14/ mu-kaan. Kokeessa stabiloidut koekappaleet altistetaan toistuvilla jäätymis-sulamissykleillä (12 kpl). Koe perustuu koekappaleiden pituuden muutoksen mittaamiseen, mutta tässä tutkimuksessa samalla tavoin rasitetuista koe-kappaleista määritettiin myös mekaanisia ja fysikaalisia ominaisuuksia sekä tilasuu-reita. Jäätymis-sulamissykliin vaikutusta em. ominaisuuksiin selvitet-tiin vertaamalla kokeen jälkeen määritettyjä ominaisuuksia vastaavalla taval-la valmistetuista 28 vrk:n ikäisistä koekappaleista määritettyihin ominai-suuksiin.

Koekappaleiden pituuden muutoksen mittaaminen näyttäisi olevan hyvä, joskin aikaavievä, menetelmä stabiloitujen materialien jäätymis-sulamiskestävyuden määrittämiseen. Suurimman sallitun laajenemisen pe-rusteella voidaan yksiselitteisesti määrittää jäätymis-sulamiskestävyuden takaava sementtipitoisuus.

Yksiaksiaalinen puristuskoe on sidotuilla materiaaleilla tienrakennuksessa paljon käytetty laadunvarmistusmenetelmä sen yksinkertaisen ja helpon suoritustavan johdosta. Tutkimuksen tulosten perusteella puristuslujuudelle ei kuitenkaan ole olemassa mitään tiettyä rajaa, joka takaisi jäätymis-sulamiskestävyuden. Suurimmalle osalle materiaaleista näyttäisi tietyn lujuustason sijaan sementtipitoisuus 3-5 % olevan riittävä puristuslujuuden jäätymis-sulamiskestävyuden kannalta. Stabiloiduilla kalliomurskeilla, joiden kiviaines on lujuudeltaan heikkoa, jää lujuustaso usein alhaiseksi vaikka ne jäätymis-sulamiskestävyydeltään olisivatkin hyviä. Lisäksi kalliomurskeilla, joiden hienoainespitoisuus on pieni, ongelmaksi muodostuu hydratoitumisen kannalta riittävän vesi-sementtisuhteen saavuttaminen. Hydratoitumaton sementtijauho haittaa sidosten syntymistä, jolloin massan sitoutuminen heikkenee ja jäädytys-sulatussykliä vaikutus lujuuteen ka sva.

Puristuslujuuden ja koekappaleiden tiheyden perusteella lasketut E-moduuliarvot vastasivat Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaisia E-moduuliarvoja arviolta sementtipitoisuudella 3,5 %, joka on em. ohjeiden suosittama maabetonin vähimmäis-sementtipitoisuus. Koska laskennalliset E-moduuliarvot riippuvat puristuslujuudesta, oli jäädytys-sulatussykliä vaikutus E-moduuliin samankaltainen kuin puristuslujuuteen.

Kalliomurskeiden dynaamiset kimmomoduulit sementtipitoisuudella 5 % vastasivat jäädytys-sulatuskokeen jälkeen myös puristuslujuudeltaan heikoimmilla materiaaleilla Sementtistabilointiohjeen / 12/ mukaisia E-moduuliarvoja. Tulosten perusteella näyttäisi, että em. sementtipitoisuus riittää kalliomurskeilla takaamaan jäätymis-sulamiskestävyuden Mr-moduulin osalta. Myös moreeneilla Mr-moduuli ja sen muuttuminen jäätymis-sulamiskokeissa näyttäisivät lujuustason sijaan olevan riippuvaisia sementin määrästä.

Sementillä stabiloitujen materiaalien lämmönjohtavuus ei jäädytys-sulatuskokeen aikana muuttunut. Myöskään vesipitoisuus ei karkearakeisilla kalliomurskemassoilla kokeen aikana muuttunut. Hienoainespitoisemmilla materiaaleilla jäädytys-sulatuskokeen aikana absorboituneen veden määrä oli sitä suurempi mitä enemmän hienoainesta materiaali sisälsi. Sementin määrän lisääminen pienensi absorboituneen veden määrää. Myös kyllästysasteet kasvoivat moreeneilla kokeen aikana selvästi, kalliomurskeilla kyllästysasteissa ennen jäädytys-sulatuskoetta ja sen jälkeen ei eroja ollut havaittavissa.

Sementillä stabiloitujen materiaalien huokoisuudet kasvoivat runkoaineen hienoainespitoisuuden kasvaessa. Rakeisuudeltaan nykyisten stabilointiohjeiden mukaisilla runkoaineilla huokoisuus oli n. 10-15 %. Jäädytys-sulatuskokeen läpi ehjänä säilyneiden koekappaleiden huokoisuudet eivät kokeen aikana juurikaan muuttuneet. Suurimmillaan muutokset olivat muuttaman prosenttiyksikön verran.

Tutkimustulosten perusteella nykyisten stabilointiohjeiden mukainen 5 MPa puristuslujuus 7 vrk:n iässä ei riitä takaamaan sementtistabiloinnin jäätymis-sulamiskestävyyttä etenkin, mikäli kyseessä ovat jo suhteellisen pienellä sementtimäärällä riittävästi lujittuvat materiaalit. Sementtistabilointiohje / 12/ suositaa sementtipitoisuuden alarajaksi asemasekoituksessa 3,5 %. Alaraja on asetettu lähinnä sementin riittävän tasaisen levittymisen varmistamiseksi. Jäätymis-sulamiskestävyyttä ajatellen em. alaraja soveltuu käytettäväksi kalliomurskeille, joiden hienoainespitoisuus on pieni. Moreeneja stabiloitaessa alarajaa on jäätymis-sulamiskestävyyden varmistamiseksi kuitenkin kasvatettava 1-2 %-yksiköllä runkoaineen hienoainespitoisuudesta riippuen.

7 KIRJALLISUUS

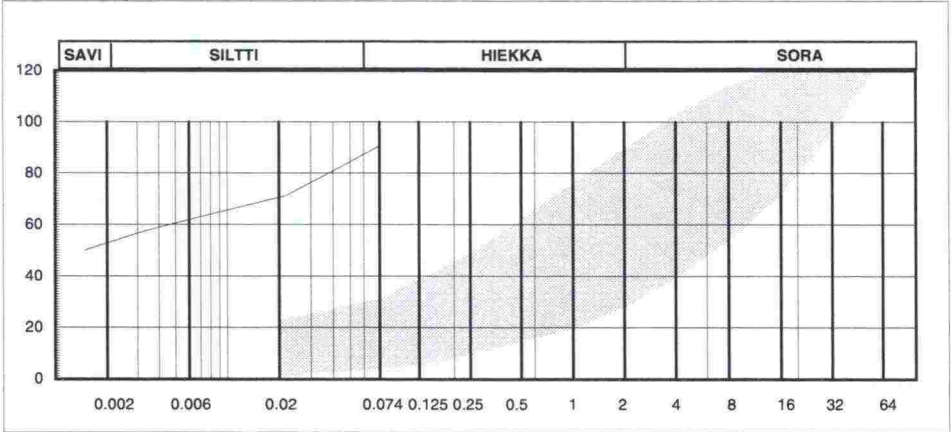
- / 1/ Asfalttinormit 1995. PANK ry, Päällystealan neuvottelukunta.Helsinki 1995. 66 s., 6 liitettä.
- / 2/ Betoninormit, by 15, viranomaisohjeet. 2. painos. Suomen Betoniyhdistys r.y. 1980.
- / 3/ Brown, S.F. & Pell, P. S. An experimental investigation of the stresses, strains and deflections in a layered pavement structure subjected to dynamic loads. Proceedings of the Second International Conference on Michigan, Ann Arbor. USA 1967. ss.487 - 504.
- / 4/ CEN/TC 227/WG 4 N 181 E, Proposal of TG 4 for Draft European Standard on "Hydraulic bound mixtures (HBM) - Test method for the determination of the compressive strength". European Committee for Standardization. 1995. 7 s.
- / 5/ Geotekniset laboratorio-ohjeet, GLO-85, 1. luokituskokeet. Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. Rakentajain Kustannus Oy. Helsinki 1985. 107 s.
- / 6/ Kuskelin, A., Orama, R. & Pouttu, P. Rakentamisen laadunvarmistus, Alusrakenne ja päällysrakenteen sitomattomat kerrokset. Valvonta ja laadunvalvonta. Tielaitos, Geokeskus. Helsinki 1994. 41 s., 11 liitettä. TIEL 2220003. ISBN 951-47-9443-5.
- / 7/ Kujala, K., Ravaska, O. Soil water content measurement with a time domain reflectometer. XIII ICSMFE. 1994.
- / 8/ Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita. Osa II. Tie- ja vesirakennushallitus (TVH). Helsinki 1980. 215 s.
- / 9/ Mäkikyrö, M. Tien runkoaineen vaikutus stabilointiin granuloiduilla masuunikuonatuotteilla. Oulun yliopisto, rakentamistekniikan osasto, geotekniikan laboratorio, lisensiaatintyö. Oulu 1995. 100 s., 6 liitettä.
- / 10/ PANK-menetelmäkansio. PANK ry, Laboratoriotoimikunta. Espoo 1995 ja 1996.
- / 11/ Saavalainen, J. Salaojittajan käsikirja, osa 1B. Kuivatuksen perusteet. Helsinki 1983.

- / 12/ Sementtistabilointiohje. Valvonta ja laadunvalvonta. Tielaitos, Tiehallitus. Helsinki 1992. 45 s., 5 liitettä. TIEL 2222614. ISBN 951-47-6848-5.
- / 13/ TP BF-StB Teil B 11.1, Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Strassenbau, Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigung mit Zement. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau. 1986. 15s.
- / 14/ TP HGT-StB 86, Technische Prüfvorschriften für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT). Köln: Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstrassen. 1986. 23 s.
- / 15/ Ylipiessa, K. Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 1. Sementillä sidotut materiaalit, kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen selvityksiä 23/1998. Tielaitos, Konsultointi, Oulun kehitysyksikkö. Oulu 1998. 52 s. TIEL 3200514. ISBN 951-726-437-2.

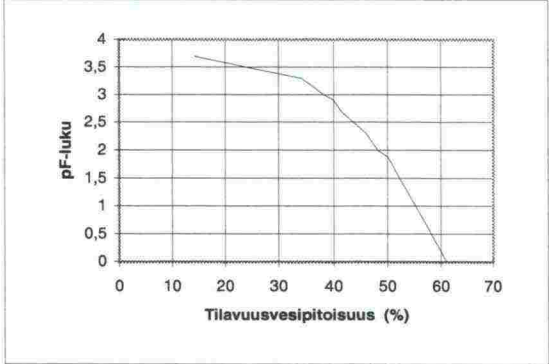
8 LIITTEET

LIITE 1	Tutkimusmateriaalien ominaisuudet
LIITE 2	Humus- ja fulvohapot
LIITE 3	Minerologiamääritykset
LIITE 4	Tietoja jäädytys-sulatus- ja vertailukoekappaleista
LIITE 5	Valokuvia jäädytys-sulatuskoekappaleista kokeen jälkeen
LIITE 6	Halkaisuvetolujuudet
LIITE 7	Vedenläpäisevyydet

Tunnus:		s1
Maalaji		liSa
Hankintapaikka		Helsinki, Viikki-Latokartano
Raeominaisuudet:		
Rakeisuus		(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)		2.6 %
Humusluokka (NaOH-menetelmä)		-
pH	< 0.074mm	7.9
	< 16 mm	-
Sähkönjohtokyky	< 0.074mm	6.08 mS/m
	< 16 mm	-
Hienoaineksen ominaispinta-ala		-
Kiintotiheys	pyknometri	2.71 t/m ³
	punnitus vedessä	-
Liuskeisuus	8...12.5 mm	-
	12.5...20 mm	-
Rakenneominaisuudet:		
Optimivesipitoisuus	< 16 mm	-
	korjattu	-
Maksimikuivatilavuuspaino		-
Kieritysraja		18.8 %
Juoksuraja		44.2 %
Plastisuusluku		25.4 %
Hydrauliset ominaisuudet:		
Kapillaarisuus		-
Vedenpidätyskyky		(Kuva 2)
Vedenadsorptioluku		-
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:		
Kuulamylyarvo		-

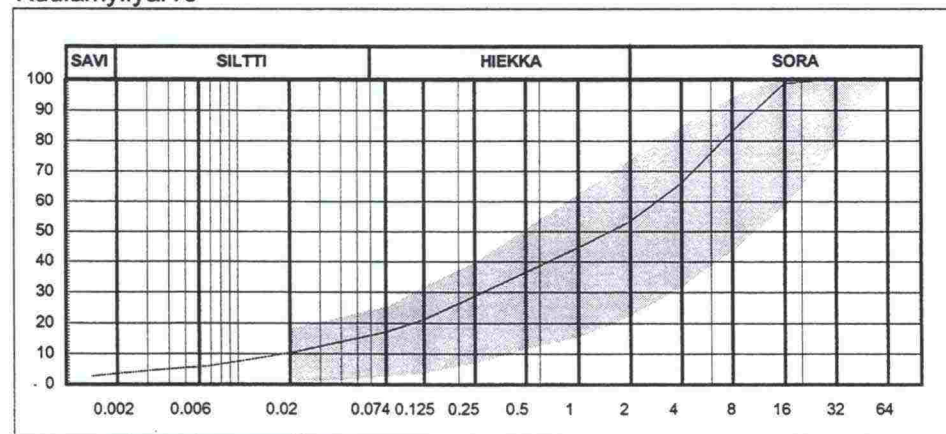


Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.

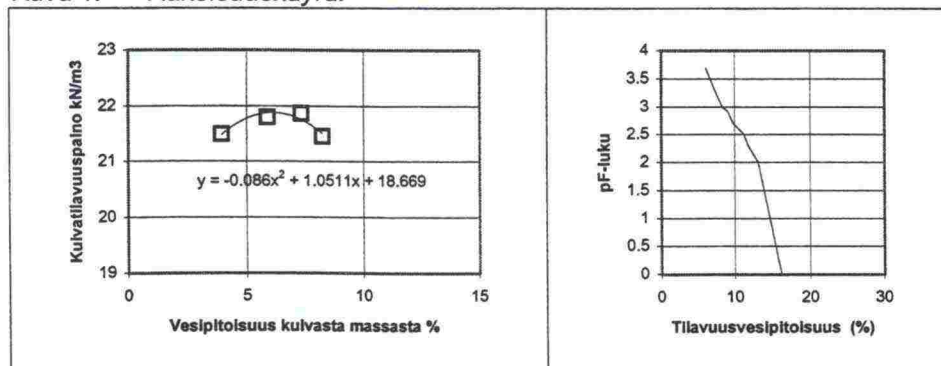


Kuva 2: Vedenpidätyskäyrä.

Tunnus:	m1		
Maalaji	MrM		
Hankintapaikka	Pihtipudas, Lahdenpohja		
Raeominaisuudet:			
Rakeisuus			(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)		1.3 %	
Humusluokka (NaOH-menetelmä)		II	
pH	< 0.074 mm	5.7	
	< 16 mm	7.5	
Sähkönjohtokyky	< 0.074 mm	0.59 mS/m	
	< 16 mm	0.59 mS/m	
Hienoaineksen ominaispinta-ala		3795 m ² /kg	
Kiintotiheys	pyknometri	2.64 t/m ³	
	punnitus vedessä	2.63 t/m ³	
Liuskeisuus	8...12.5 mm	-	
	12.5...20 mm	-	
Rakenneominaisuudet:			
Optimivesipitoisuus	< 16 mm	6.1 %	(Kuva 2)
	korjattu	6 %	
Maksimikuivatilavuuspaino		21.88 kN/m ³	(Kuva 2)
Kieritysraja		-	
Juoksuraja		-	
Plastisuusluku		-	
Hydrauliset ominaisuudet:			
Kapillaarisuus		1.49 m	
Vedenpidätyskyky			(Kuva 3)
Vedenadsorptioluku		0.55 %	
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:			
Kuulamyllvarvo		-	



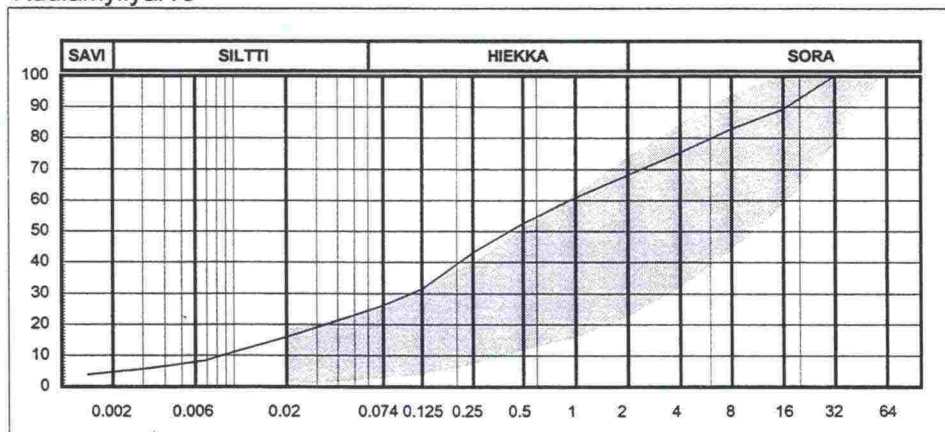
Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.



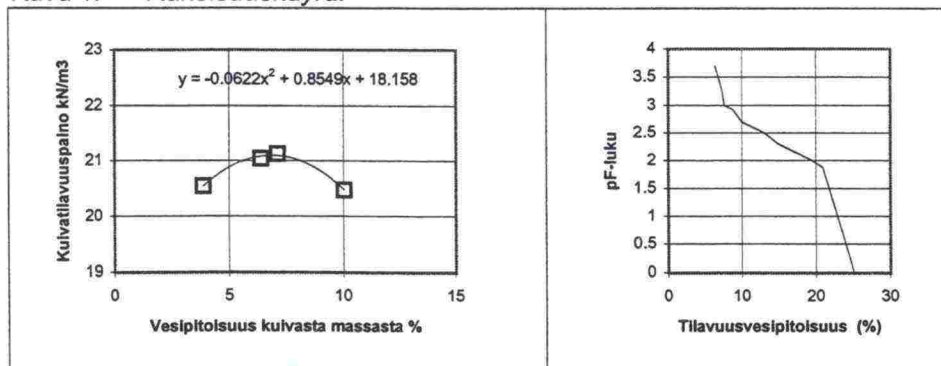
Kuva 2: Parannettu proctorkoe.

Kuva 3: Vedenpidätyskäyrä.

Tunnus:		m2
Maalaji		srHkMr
Hankintapaikka		Pihtipudas, Lahdenpohja
Raeominaisuudet:		
Rakeisuus		(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)		1.4 %
Humusluokka (NaOH-menetelmä)		IV
pH	< 0.074 mm	5.3
	< 16 mm	5.6
Sähkönjohtokyky	< 0.074 mm	1.67 mS/m
	< 16 mm	0.64 mS/m
Hienoaineksen ominaispinta-ala		3071 m ² /kg
Kiintotiheys	pyknometri	2.63 t/m ³
	punnitus vedessä	2.62 t/m ³
Liuskeisuus	8...12.5 mm	-
	12.5...20 mm	-
Rakenneominaisuudet:		
Optimivivesipitoisuus	< 16 mm	6.9 % (Kuva 2)
	korjattu	6.2 %
Maksimikuivatilavuuspaino		21.1 kN/m ³ (Kuva 2)
Kieritysraja		-
Juoksuraja		-
Plastisuusluku		-
Hydrauliset ominaisuudet:		
Kapillaarisuus		1.97 m
Vedenpidätyskyky		(Kuva 3)
Vedenadsorptioluku		0.83 %
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:		
Kuulamylyarvo		-



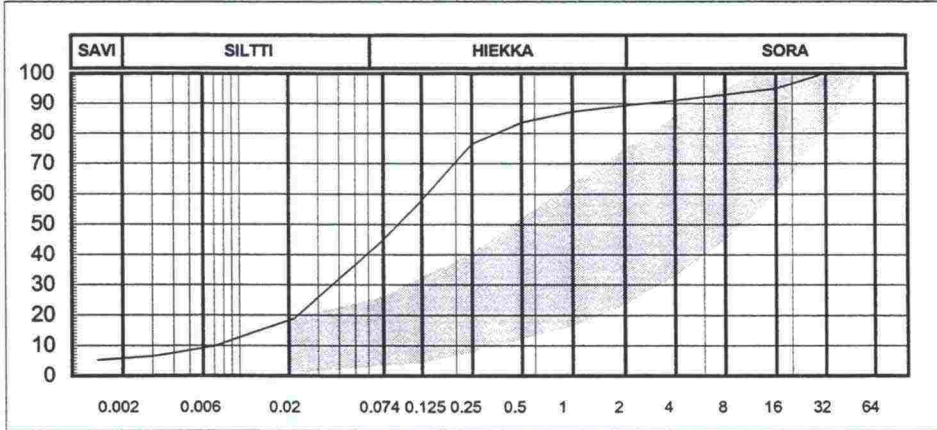
Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.



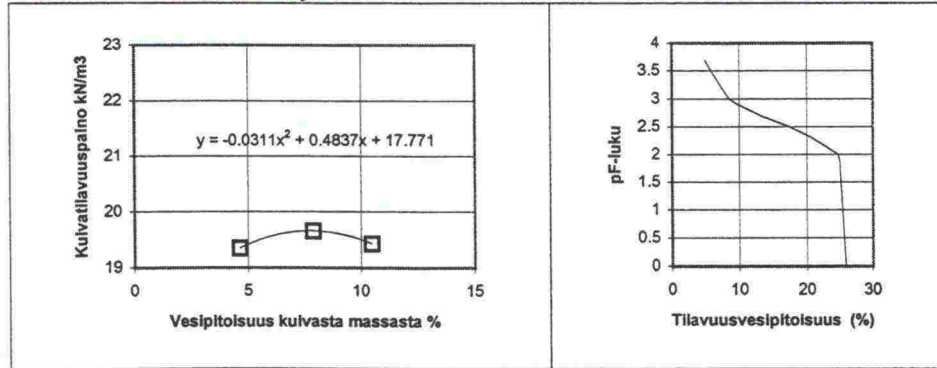
Kuva 2: Parannettu proctorkoe.

Kuva 3: Vedenpidätyskäyrä.

Tunnus:		m3	
Maalaji		siHkMr	
Hankintapaikka		Pulkkila, Uljua	
Raeominaisuudet:			
Rakeisuus			(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)		0.6 %	
Humusluokka (NaOH-menetelmä)		II	
pH	< 0.074 mm	6	
	< 16 mm	6.1	
Sähkönjohtokyky	< 0.074 mm	0.31 mS/m	
	< 16 mm	0.35 mS/m	
Hienoaineksen ominaispinta-ala		3009 m ² /kg	
Kiintotiheys	pyknometri	2.68 t/m ³	
	punnitus vedessä	2.63 t/m ³	
Liuskeisuus	8...12.5 mm	-	
	12.5...20 mm	-	
Rakenneominaisuudet:			
Optimivesipitoisuus	< 16 mm	7.8 %	(Kuva 2)
	korjattu	7.4 %	
Maksimikuivatilavuuspaino		19.65 kN/m ³	(Kuva 2)
Kieritysraja		-	
Juoksuraja		-	
Plastisuusluku		-	
Hydrauliset ominaisuudet:			
Kapillaarisuus		0.93 m	
Vedenpidätyskyky			(Kuva 3)
Vedenadsorptioluku:		0.53 %	
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:			
Kuulamylyllyarvo		-	



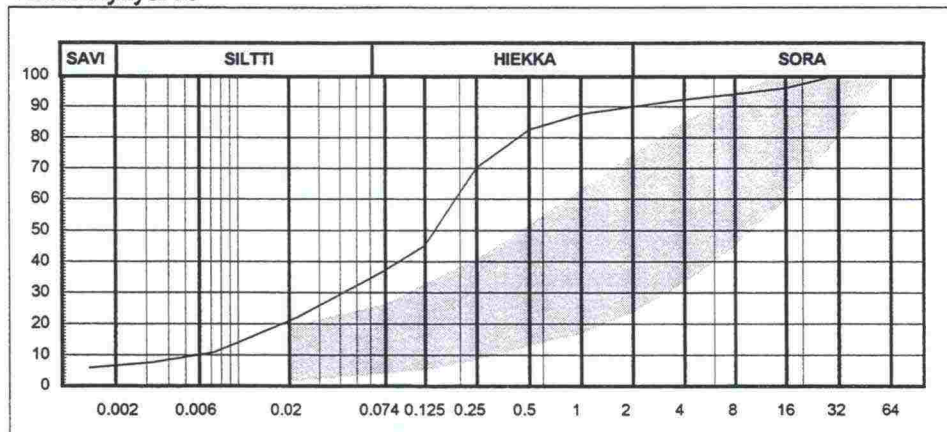
Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.



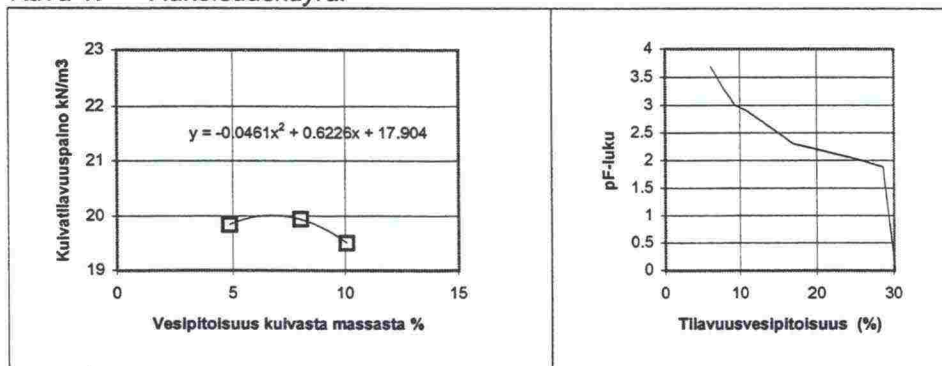
Kuva 2: Parannettu proctorkoe.

Kuva 3: Vedenpidätyskäyrä.

Tunnus:		m4	
Maalaji		siHkMr	
Hankintapaikka		Kempele, Linnakangas	
Raeominaisuudet:			
Rakeisuus			(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)		1.5 %	
Humusluokka (NaOH-menetelmä)		IV	
pH	< 0.074 mm	3.9	
	< 16 mm	4.2	
Sähkönjohtokyky	< 0.074 mm	4.03 mS/m	
	< 16 mm	2.4 mS/m	
Hienoaineksen ominaispinta-ala		1048 m ² /kg	
Kiintotiheys	pyknometri	2.63 t/m ³	
	punnitus vedessä	2.65 t/m ³	
Liuskeisuus	8...12.5 mm	-	
	12.5...20 mm	-	
Rakenneominaisuudet:			
Optimivesipitoisuus	< 16 mm	6.8 %	(Kuva 2)
	korjattu	6.5 %	
Maksimikuivatilavuuspaino		20.01 kN/m ³	(Kuva 2)
Kieritysraja		-	
Juoksuraja		-	
Plastisuusluku		-	
Hydrauliset ominaisuudet:			
Kapillaarisuus		1.3 m	
Vedenpidätyskyky			(Kuva 3)
Vedenadsorptioluku		0.61 %	
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:			
Kuulamyilyarvo		-	



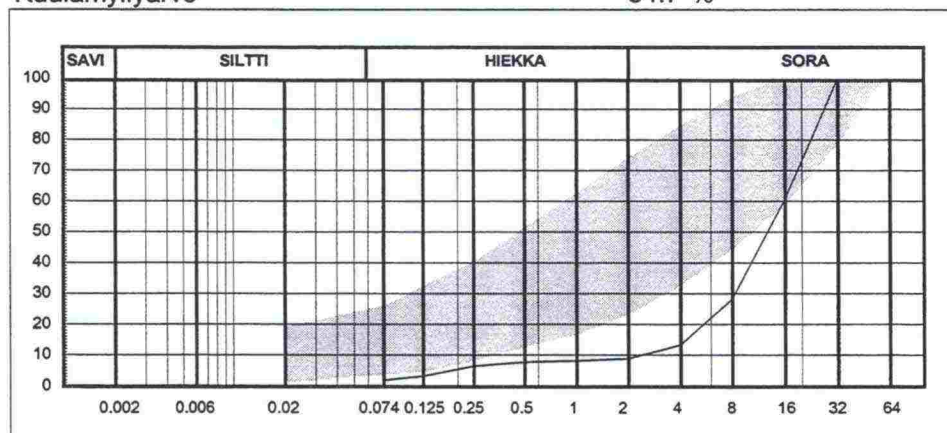
Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.



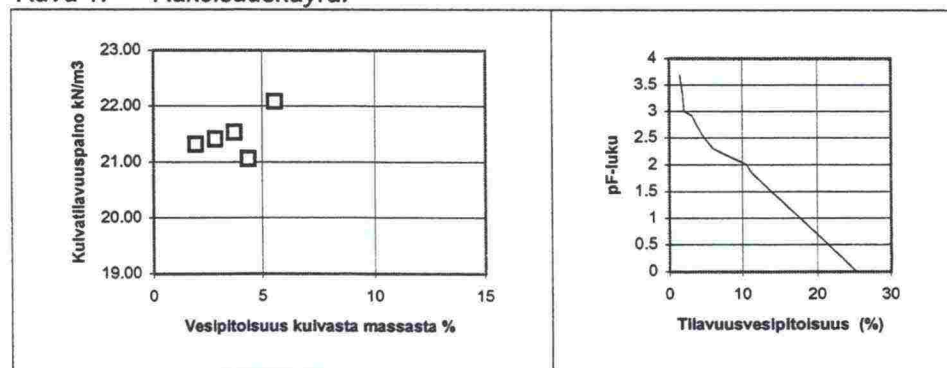
Kuva 2: Parannettu proctorkoe.

Kuva 3: Vedenpidätyskäyrä.

Tunnus:	M1
Maalaji	KaM
Hankintapaikka	Nurmo, Ala-autio
Raeominaisuudet:	
Rakeisuus	(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)	1.1 %
Humusluokka (NaOH-menetelmä)	I
pH	< 0.074 mm 10.2
	< 16 mm 9.7
Sähkönjohtokyky	< 0.074 mm 8.4 mS/m
	< 16 mm 1.27 mS/m
Hienoaineksen ominaispinta-ala	1956 m ² /kg
Kiintotiheys	pyknometri 2.78 t/m ³
	punnitus vedessä 2.73 t/m ³
Liuskeisuus	8...12.5 mm 20.8 %
	12.5...20 mm 18.8 %
Rakenneominaisuudet:	
Optimivesipitoisuus	< 32 mm - (Kuva 2)
	korjattu -
Maksimikuivatilavuuspaino	21.52 kN/m ³ (Kuva 2)
Kieritysraja	-
Juoksuraja	-
Plastisuusluku	-
Hydrauliset ominaisuudet:	
Kapillaarisuus:	0.47 m
Vedenpidätyskyky	(Kuva 3)
Vedenadsorptioluku	0.47 %
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:	
Kuulamylyarvo	34.7 %



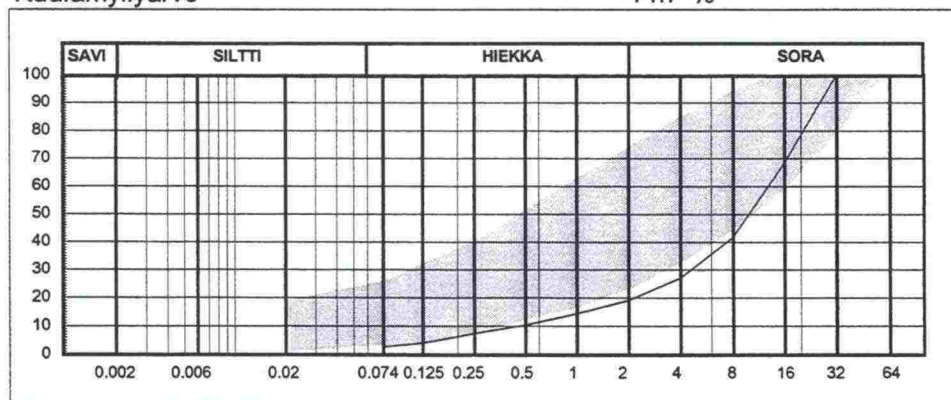
Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.



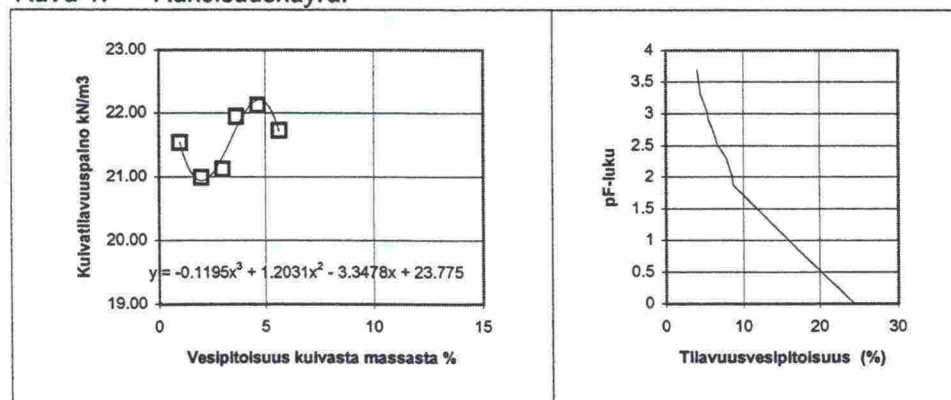
Kuva 2: Parannettu proctorkoe.

Kuva 3: Vedenpidätyskäyrä.

Tunnus:		M2
Maalaji		KaM
Hankintapaikka		Kemi, Eljäjärvi
Raeominaisuudet:		
Rakeisuus		(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)		9.4 %
Humusluokka (NaOH-menetelmä)		0
pH	< 0.125 mm	9.1
	< 16 mm	9.7
Sähkönjohtokyky	< 0.125 mm	4.62 mS/m
	< 16 mm	1.49 mS/m
Hienoaineksen ominaispinta-ala		10106 m ² /kg
Kiintotiheys	pyknometri	2.87 t/m ³
	punnitus vedessä	2.82 t/m ³
Liuskeisuus	8...12.5 mm	24.1 %
	12.5...20 mm	21.6 %
Rakenneominaisuudet:		
Optimivesipitoisuus	< 32 mm	4.7 %
	korjattu	-
Maksimikuivatilavuuspaino		22.2 kN/m ³ (Kuva 2)
Kieritysraja		-
Juoksuraja		-
Plastisuusluku		-
Hydrauliset ominaisuudet:		
Kapillaarisuus		0.5 m
Vedenpidätyskyky		(Kuva 3)
Vedenadsorptioluku		1.88 %
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:		
Kuulamylyarvo		14.7 %



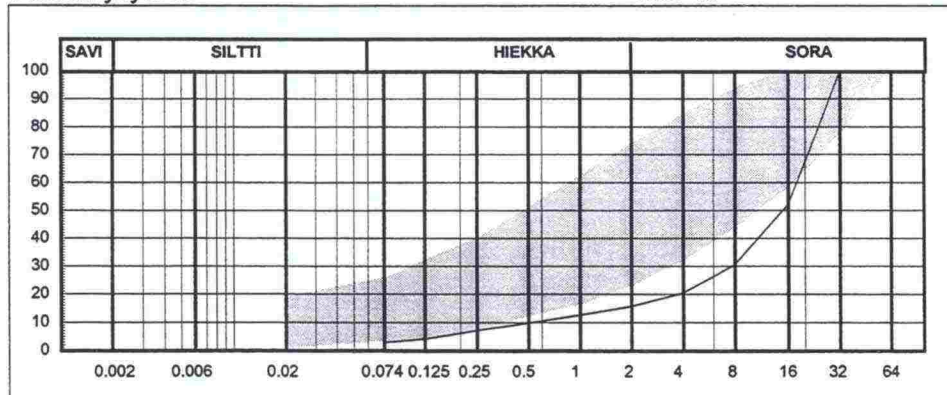
Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.



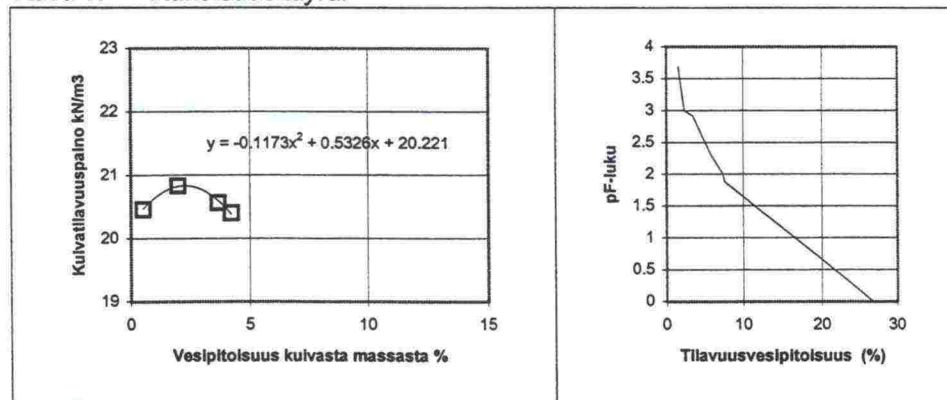
Kuva 2: Parannettu proctorkoe.

Kuva 3: Vedenpidätyskäyrä.

Tunnus:		M3
Maalaji		KaM
Hankintapaikka		Kempele, Linnakangas
Raeominaisuudet:		
Rakeisuus		(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)		0.8 %
Humusluokka (NaOH-menetelmä)		I
pH	< 0.074 mm	7.9
	< 16 mm	6.8
Sähkönjohtokyky	< 0.074 mm	6.33 mS/m
	< 16 mm	0.97 mS/m
Hienoaineksen ominaispinta-ala		2018 m ² /kg
Kiintotiheys	pyknometri	2.65 t/m ³
	punnitus vedessä	2.62 t/m ³
Liuskeisuus	8...12.5 mm	22.1 %
	12.5...20 mm	17.9 %
Rakenneominaisuudet:		
Optimivesipitoisuus	< 32 mm	2.3 %
	korjattu	-
Maksimikuivatilavuuspaino		20.83 kN/m ³ (Kuva 2)
Kieritysraja		-
Juoksuraja		-
Plastisuusluku		-
Hydrauliset ominaisuudet:		
Kapillaarisuus		0.42 m
Vedenpidätyskyky		(Kuva 3)
Vedenadsorptioluku		0.37 %
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:		
Kuulamylyllyarvo		15.8 %



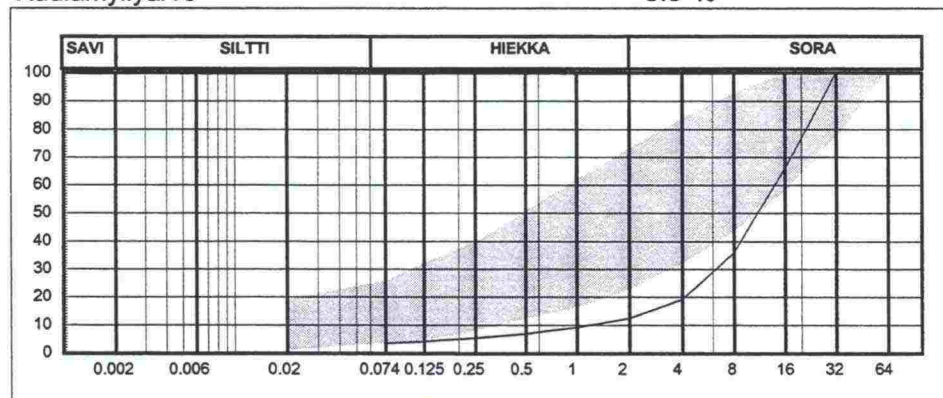
Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.



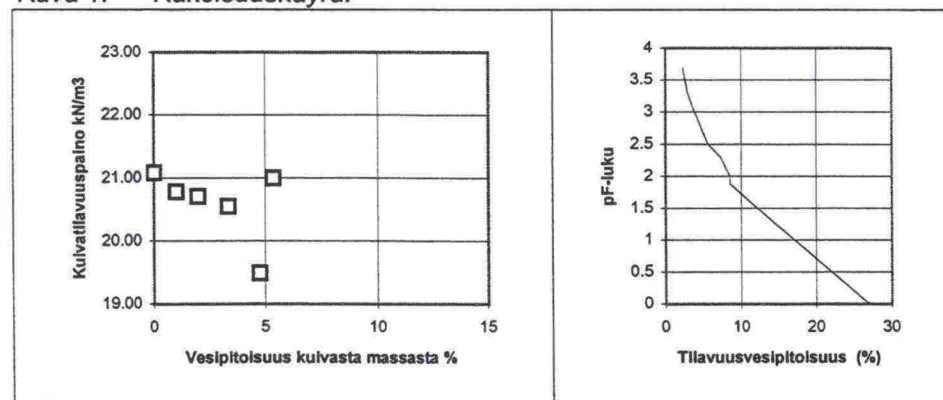
Kuva 2: Parannettu proctorkoe.

Kuva 3: Vedenpidätyskäyrä.

Tunnus:		M4
Maalaji		KaM
Hankintapaikka		Sievi, Korianmäki
Raeominaisuudet:		
Rakeisuus		(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)		1.8 %
Humusluokka (NaOH-menetelmä)		I
pH	< 0.074 mm	8.8
	< 16 mm	9
Sähkönjohtokyky	< 0.074 mm	2.27 mS/m
	< 16 mm	1.12 mS/m
Hienoaineksen ominaispinta-ala		2392 m ² /kg
Kiintotiheys	pyknometri	2.83 t/m ³
	punnitus vedessä	2.79 t/m ³
Liuskeisuus	8...12.5 mm	30 %
	12.5...20 mm	33.5 %
Rakenneominaisuudet:		
Optimivesipitoisuus	< 32 mm	-
	korjattu	-
Maksimikuivatilavuuspaino		20.7 kN/m ³ (Kuva 2)
Kieritysraja		-
Juoksuraja		-
Plastisuusluku		-
Hydrauliset ominaisuudet:		
Kapillaarisuus		0.47 m
Vedenpidätyskyky		(Kuva 3)
Vedenadsorptioluku		0.72 %
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:		
Kuulamylyarvo		8.5 %



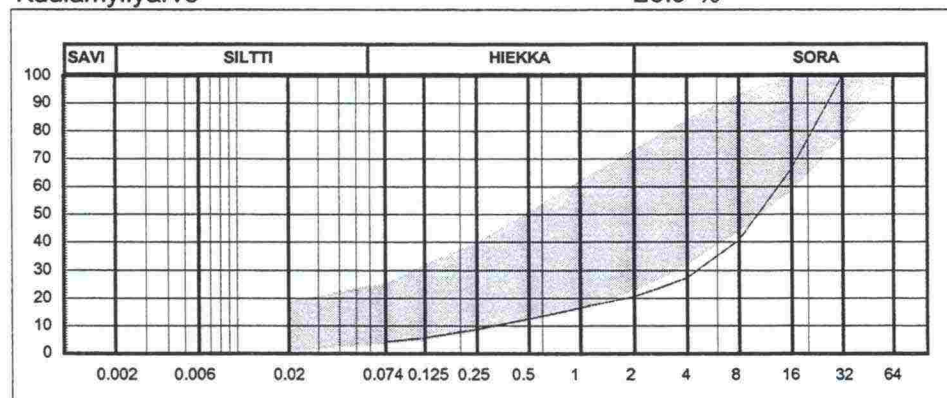
Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.



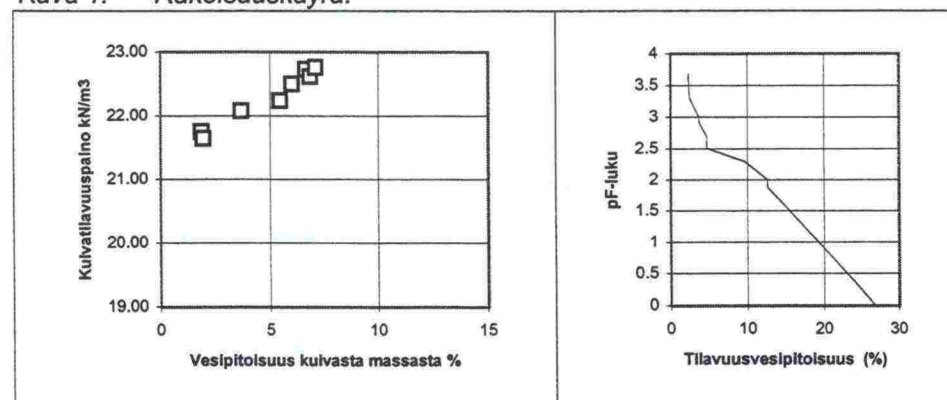
Kuva 2: Parannettu proctorkoe.

Kuva 3: Vedenpidätyskäyrä.

Tunnus:	M5
Maalaji	KaM
Hankintapaikka	Mikkeli, Tikkala
Raeominaisuudet:	
Rakeisuus	(Kuva 1)
Humuspitoisuus (polttomenetelmä)	1.9 %
Humusluokka (NaOH-menetelmä)	I
pH	< 0.074 mm 6.2
	< 16 mm 5.9
Sähkönjohtokyky	< 0.074 mm 14.5 mS/m
	< 16 mm 2.82 mS/m
Hienoaineksen ominaispinta-ala	4641 m ² /kg
Kiintotiheys	pyknometri 2.79 t/m ³
	punnitus vedessä 2.74 t/m ³
Liuskeisuus	8...12.5 mm 15.4 %
	12.5...20 mm 17.4 %
Rakenneominaisuudet:	
Optimivesipitoisuus	< 32 mm 7 % (Kuva 2)
	korjattu -
Maksimikuivatilavuuspaino	22.7 kN/m ³ (Kuva 2)
Kieritysraja	-
Juoksuraja	-
Plastisuusluku	-
Hydrauliset ominaisuudet:	
Kapillaarisuus	0.59 m
Vedenpidätyskyky	(Kuva 3)
Vedenadsorptioluku	1.18 %
Kiviaineksen lujuusominaisuudet:	
Kuulamylyarvo	26.9 %



Kuva 1: Rakeisuuskäyrä.



Kuva 2: Parannettu proctorkoe.

Kuva 3: Vedenpidätyskäyrä.

HUMUS- JA FULVOHAPOT

Materiaali	Fulvohapot (%)	Humushapot (%)
s1	2.48	13.82
m1	0.44	0.31
m2	0.16	0.27
m3	0.38	0.18
m4	0.57	0.49

Pitoisuudet on ilmoitettu prosentteina kuivassa näytteessä.
Määritykset on tehty 4 mm seulan läpäisevästä lajitteesta.

Fulvohappojen osalta menetelmän kokonaisvirhe ± 20 %.
Humushappojen osalta menetelmän kokonaisvirhe < 5 %.

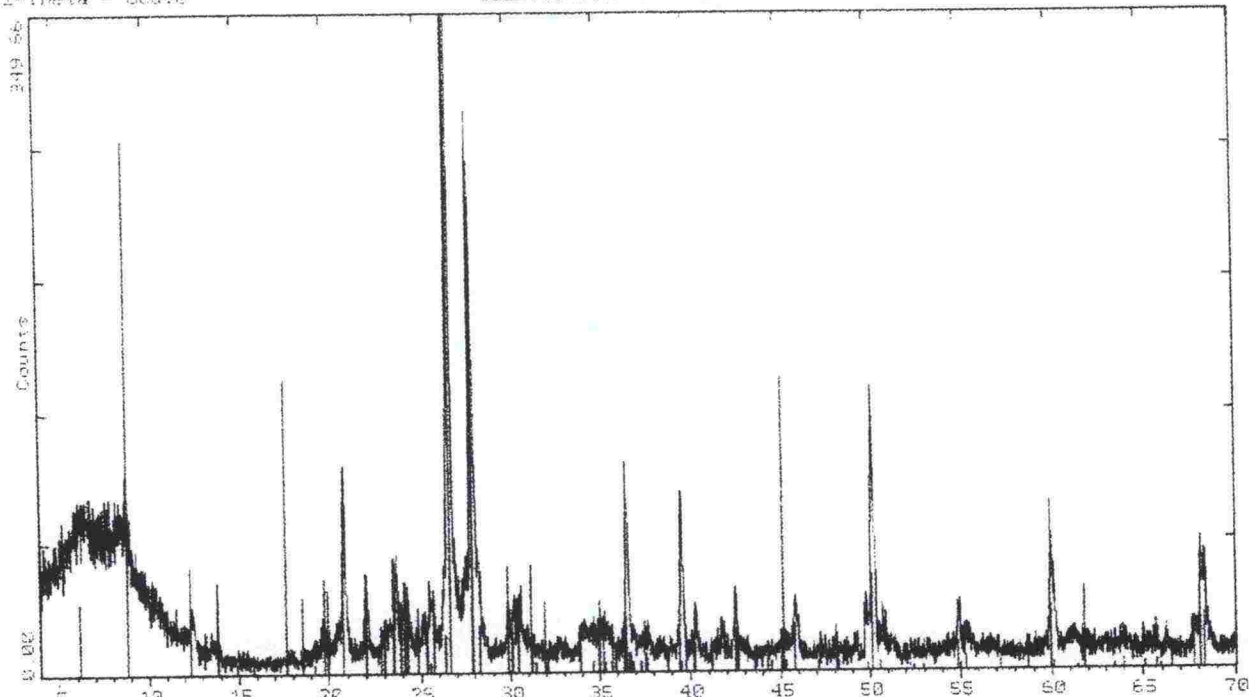
MINERAALIMÄÄRITYKSET

Käytettyjen materiaalitunnusten selitykset:

KYS1HIENO	s1
KYM1HIENO	m1 hienoaines < 0,074 mm
KYM1KARKEA	m1 karkea lajite 10...16 mm
KYM2HIENO	m2 hienoaines < 0,074 mm
KYM2KARKEA	m2 karkea lajite 10...16 mm
KYM3HIENO	m3 hienoaines < 0,074 mm
KYM3KARKEA	m3 karkea lajite 10...16 mm
KYM4HIENO	m4 hienoaines < 0,074 mm
KYM4KARKEA	m4 karkea lajite 10...16 mm
KYMU1HIENO	M1 hienoaines < 0,074 mm
KYMU1KARKEA	M1 karkea lajite 10...16 mm
KYMU2HIENO	M2 hienoaines < 0,074 mm
KYMU2KARKEA	M2 karkea lajite 10...16 mm
KYMU3HIENO	M3 hienoaines < 0,074 mm
KYMU3KARKEA	M3 karkea lajite 10...16 mm
KYMU4HIENO	M4 hienoaines < 0,074 mm
KYMU4KARKEA	M4 karkea lajite 10...16 mm
KYMU5HIENO	M5 hienoaines < 0,074 mm
KYMU5KARKEA	M5 karkea lajite 10...16 mm

2-Theta - Scale

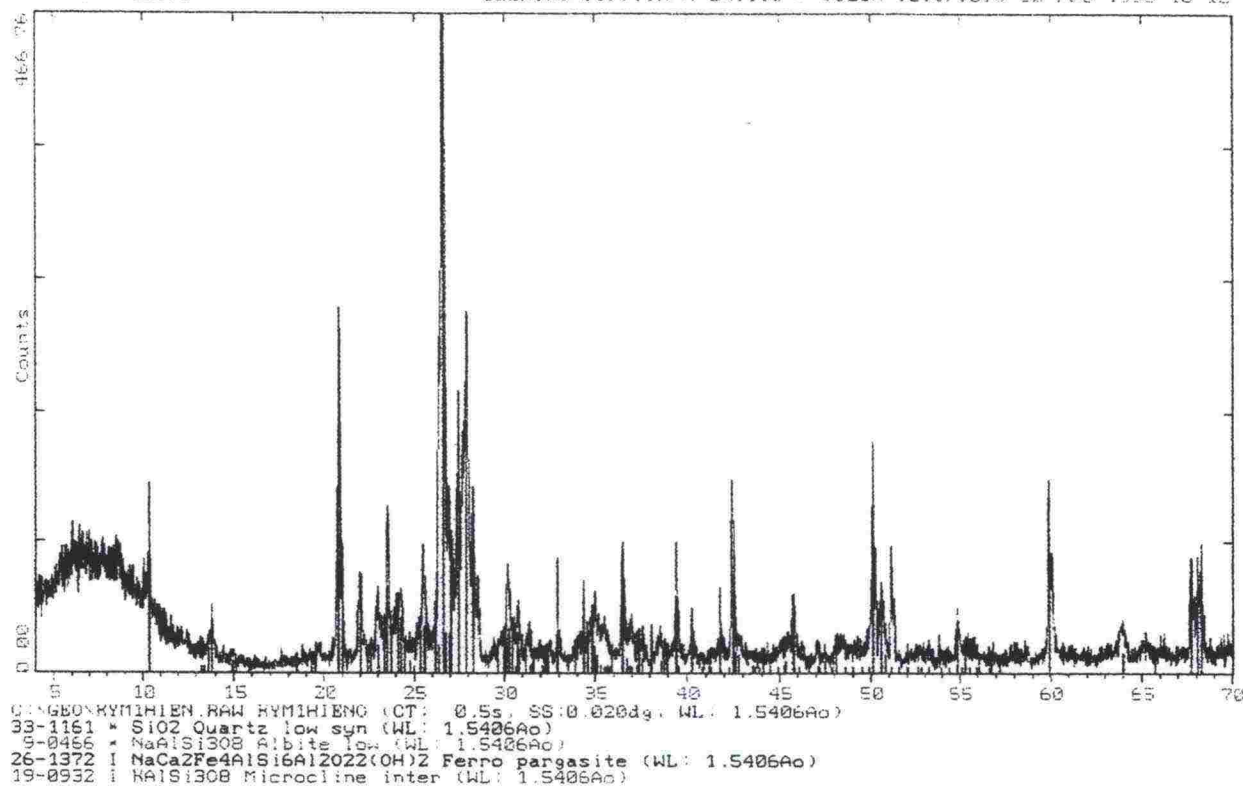
ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 03-Feb-1998 15:32



00-0460 KYSIH1EM.RAW KYSIH1ENO (CT: 0.5s, SS:0.0200s, WL: 1.5406Ao)
 00-0911 (K,H3O)Al2Si3AlO10(OH)2 Illite M (WL: 1.5406Ao)
 00-1161 SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
 00-0466 NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
 00-0853 Mg5Al(Si3Al)O10(OH)8 Clinocllore 11b (WL: 1.5406Ao)

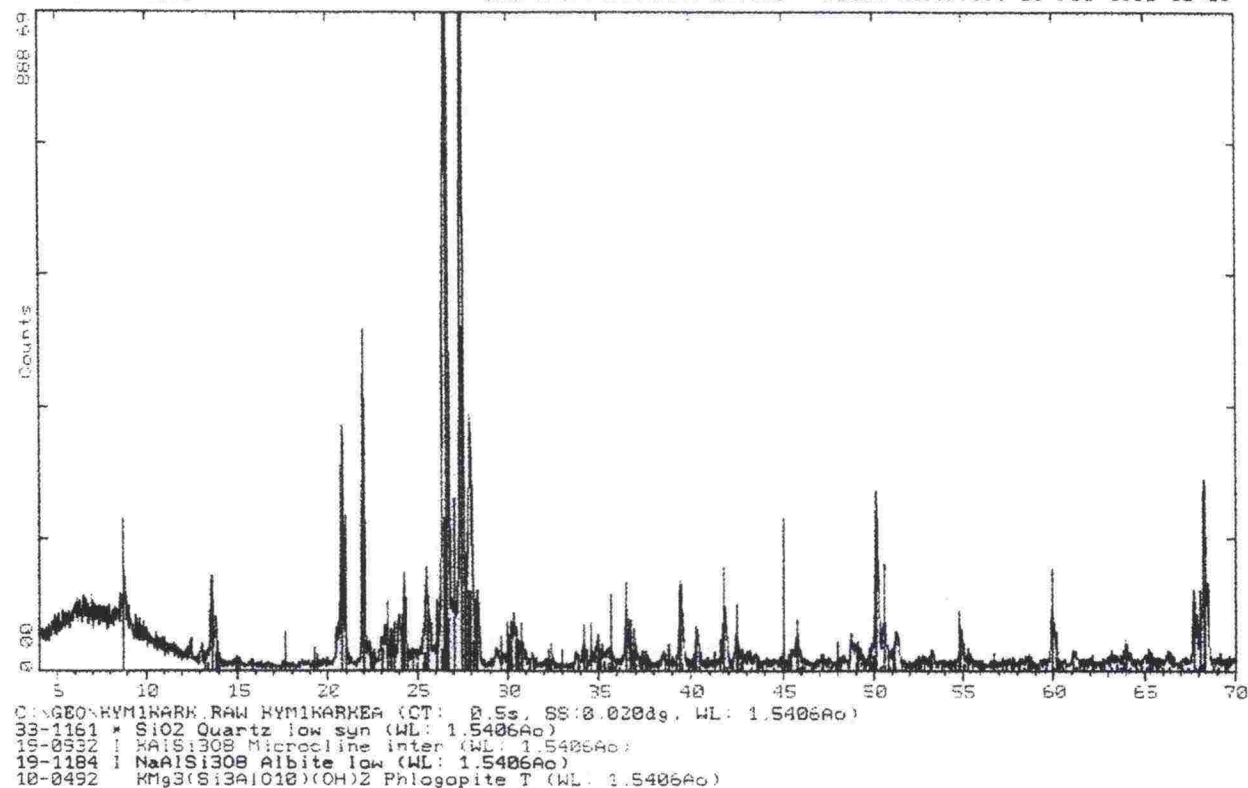
2-Theta - Scale

ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 02-Feb-1998 10:12



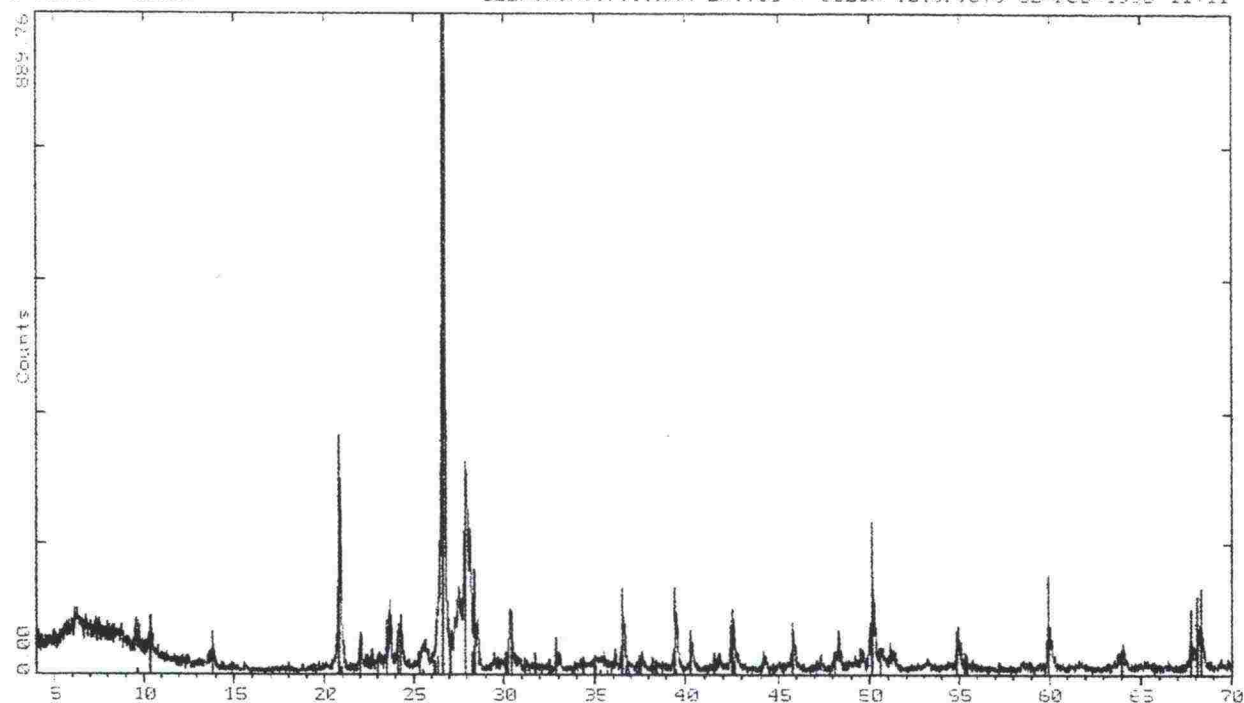
2-Theta - Scale

ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 03-Feb-1998 15:39



2-Theta - Scale

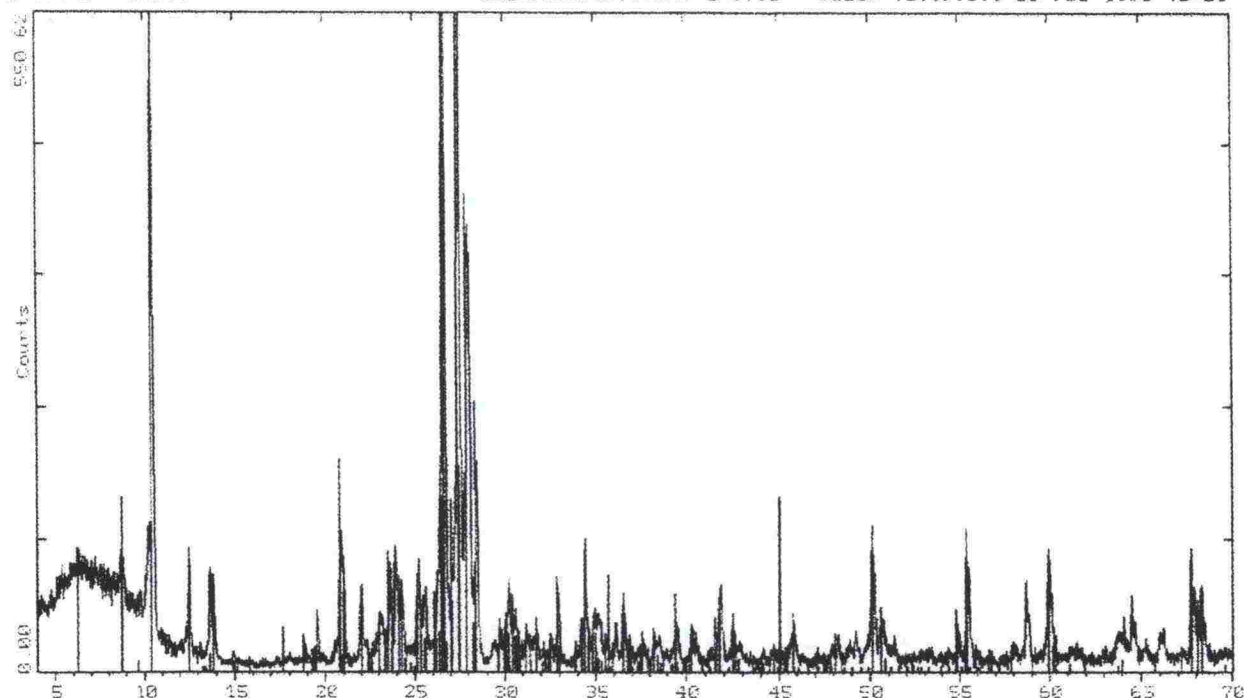
ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 02-Feb-1998 11:11



C:\GEO\KVM2HIEN.RAW KVM2HIENO (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
 39-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
 9-0465 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
 21-0149 | Ca2(Mg,Fe)5(Si,Al)8O22(OH)2 Magnesian hornblende ferroan (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

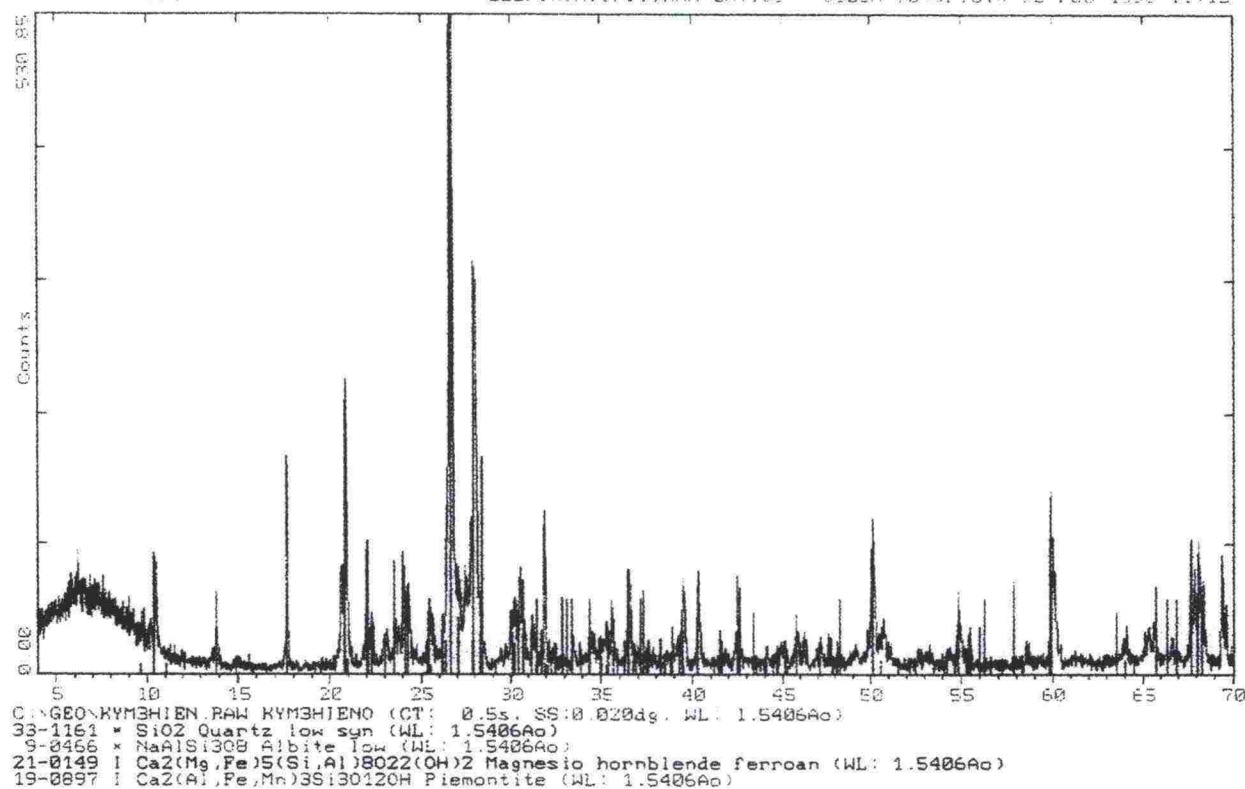
ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 06-Feb-1998 13:21



C:\GEO\KVM2KARKEA.RAW KVM2KARKEA (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
 39-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
 9-0465 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
 19-0932 | KAlSi3O8 Microcline inter (WL: 1.5406Ao)
 21-0149 | Ca2(Mg,Fe)5(Si,Al)8O22(OH)2 Magnesian hornblende ferroan (WL: 1.5406Ao)
 10-0492 | KMg3(Si3Al10)10(OH)2 Phlogopite T (WL: 1.5406Ao)
 7-0078 (Mg,Fe,Al)6(Si,Al)14O18(OH)8 Clinocllore Tib ferroan (WL: 1.5406Ao)

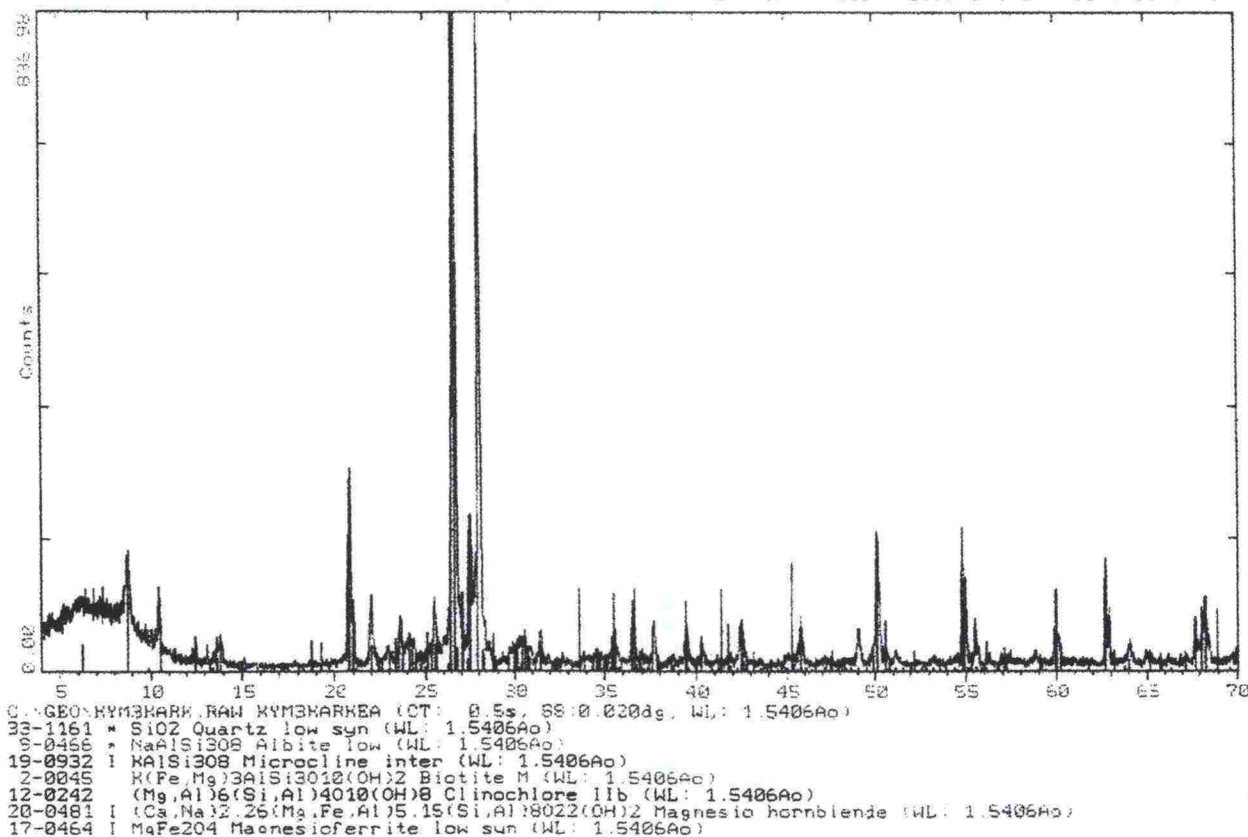
2-Theta - Scale

ELEKTRONIOPITILIAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 02-Feb-1998 11:12



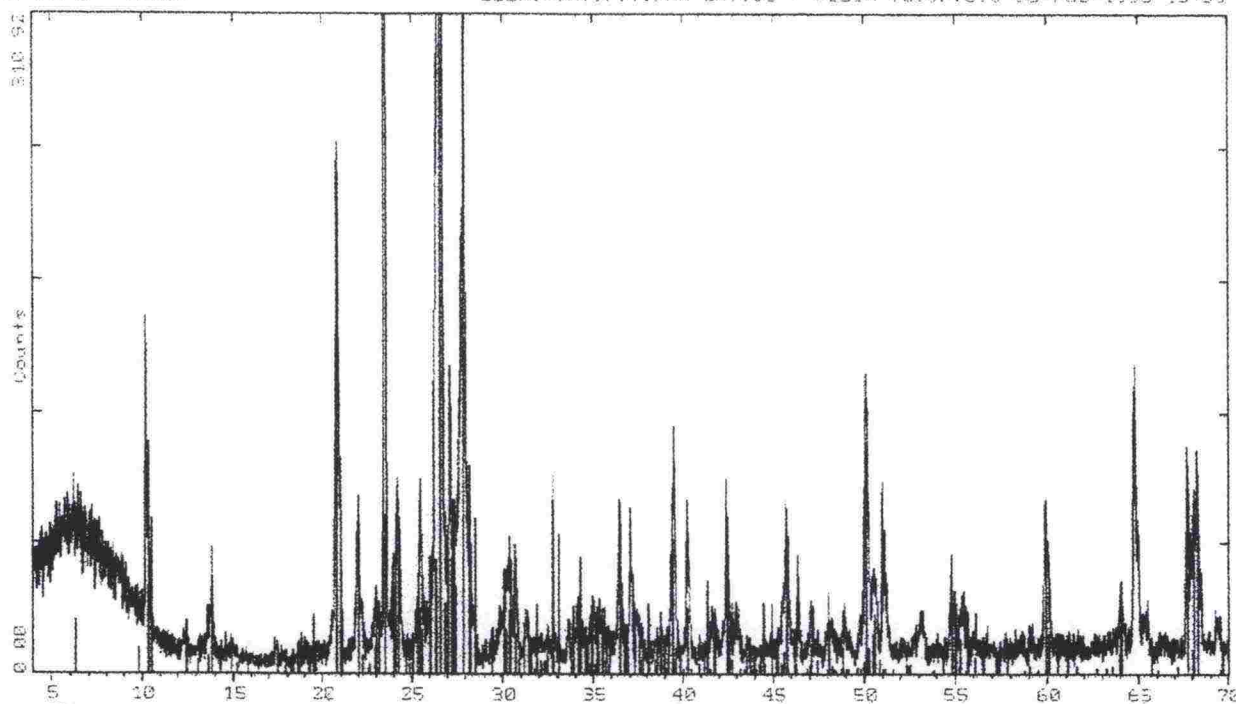
2-Theta - Scale

ELEKTRONIOPITILIAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 06-Feb-1998 13:17



2-Theta - Scale

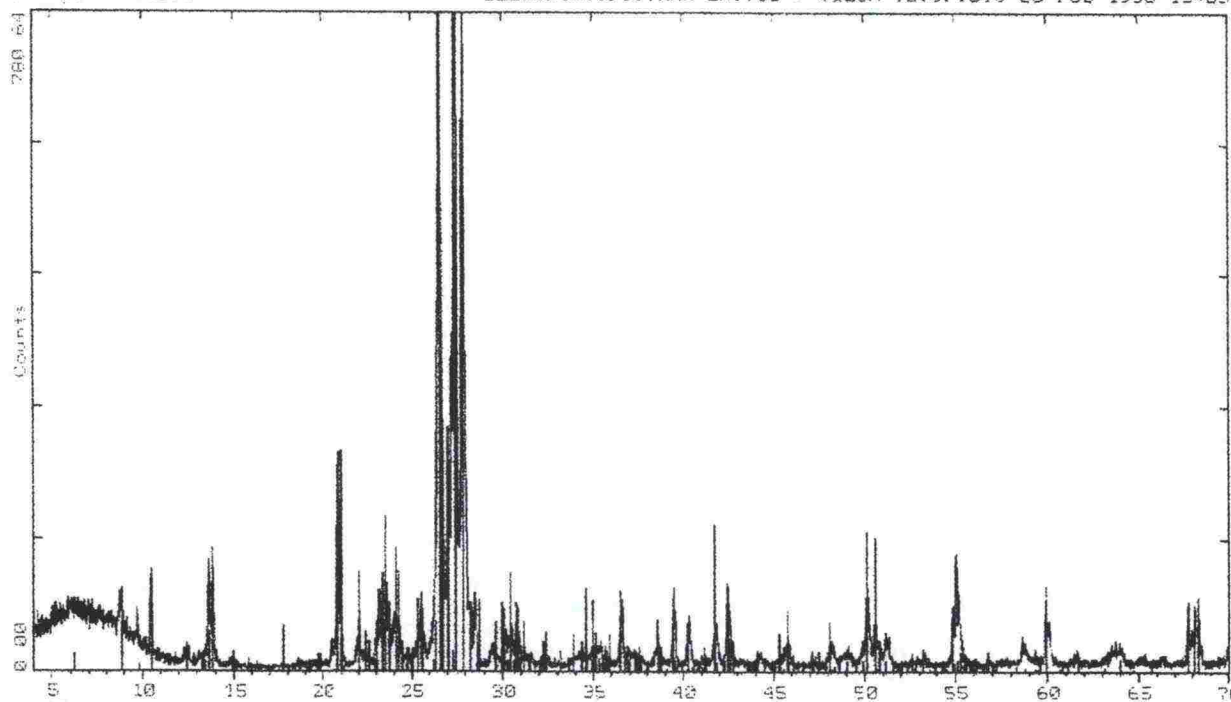
ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 06-Feb-1998 13:05



C:\GEO\RYM4HIEN.RAW RYM4HIEN (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
 33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
 9-0466 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
 7-0165 (Mg,Al,Fe)6(Si,Al)4O10(OH)8 Clinoclone Iib (WL: 1.5406Ao)
 19-0926 * KAlSi3O8 Microcline max (WL: 1.5406Ao)
 29-1258 I (Na,K)Ca2(Fe,Mg)5(Al,Si)8O22(OH)2 Ferro hornblende pargasitic (WL: 1.5406Ao)
 13-0437 I Ca2MgSi8O22(OH)2 Tremolite (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

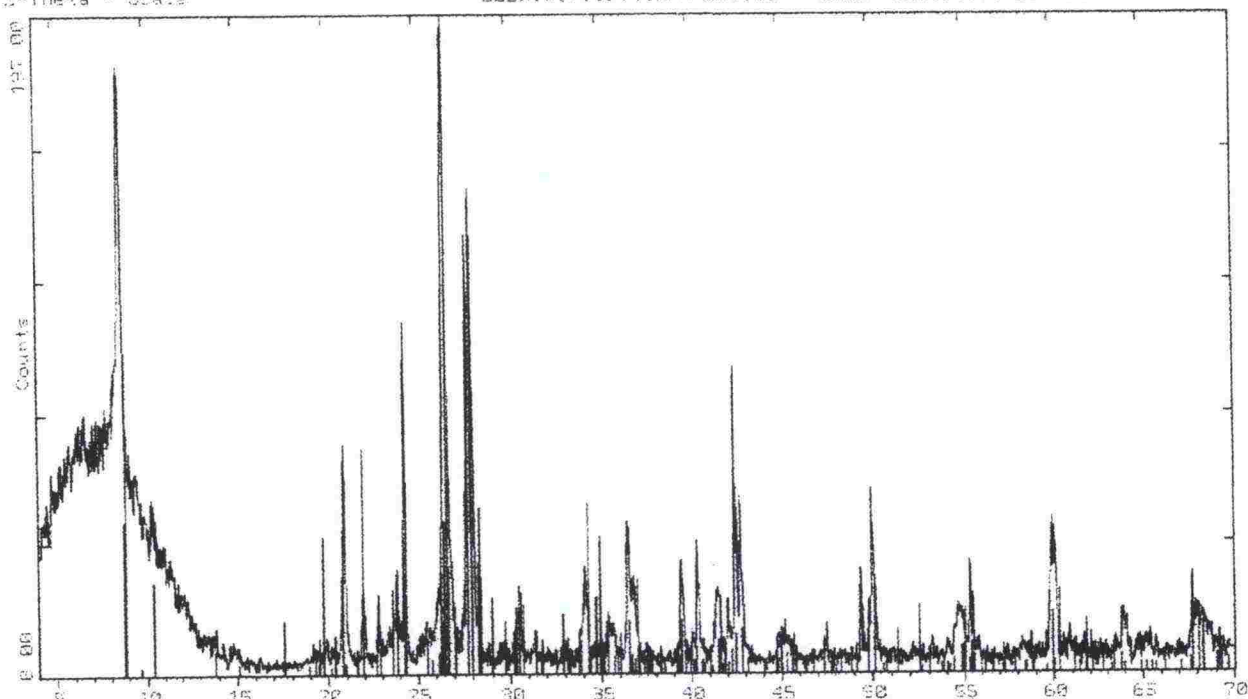
ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 06-Feb-1998 13:03



C:\GEO\RYM4HARRE.RAW RYM4HARRE (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
 33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
 9-0466 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
 19-0932 I KAlSi3O8 Microcline inter (WL: 1.5406Ao)
 20-0481 I (Ca,Na)2.26(Mg,Fe,Al)5.15(Si,Al)8O22(OH)2 Magnesian hornblende (WL: 1.5406Ao)
 7-0042 I (K,Na)(Al,Mg,Fe)2(Si3.1Al0.9)O10(OH)2 Muscovite T (WL: 1.5406Ao)
 16-0362 (Mg,Fe,Al)(Si,Al)4O10(OH)8 Clinoclone Ia ferroan (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

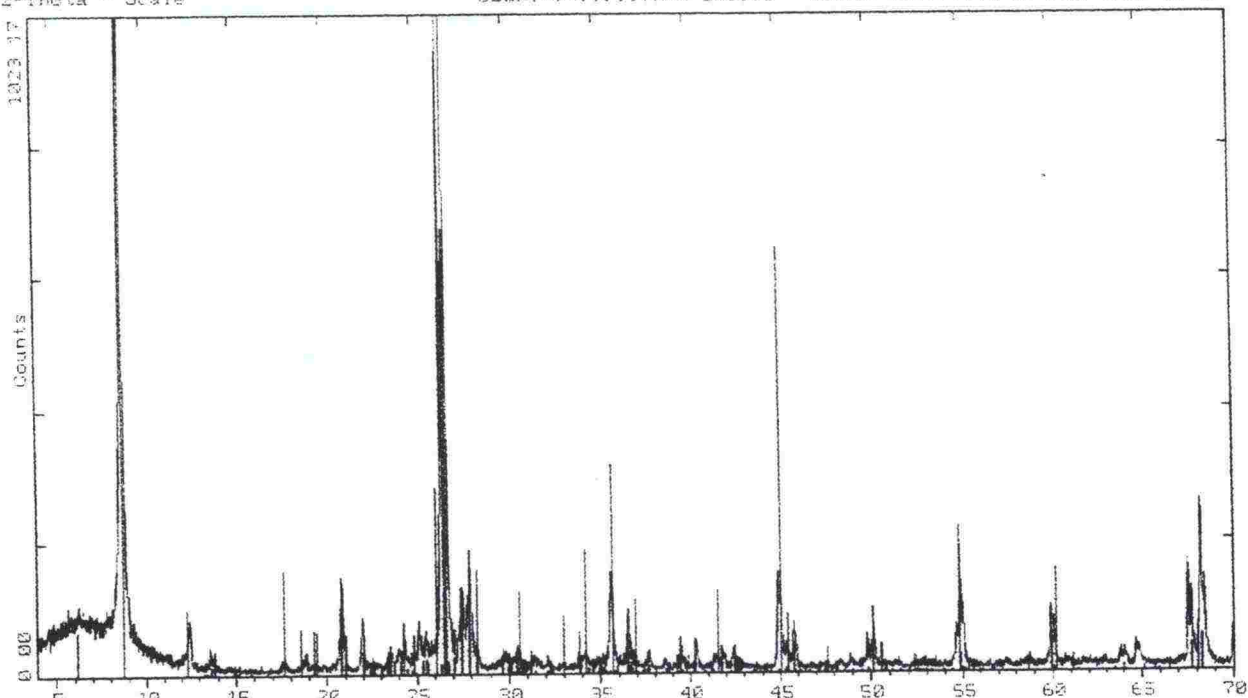
ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 06-Feb-1998 13:13



C:\GEO\KVMU1H1E.RAW KVMU1H1E.N (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
 33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
 04-0159 C KAg3Si3AlO10(F,OH)2 Phlogopite M (WL: 1.5406Ao)
 21-0149 I Ca2(Mg,Fe)5(Si,Al)8O22(OH)2 Magnesio hornblende ferroan (WL: 1.5406Ao)
 20-0548 C (Na,Ca)(Si,Al)4O8 Albite calcian high (WL: 1.5406Ao)
 7-0025 I KAl2Si3AlO10(OH)2 Muscovite M syn (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

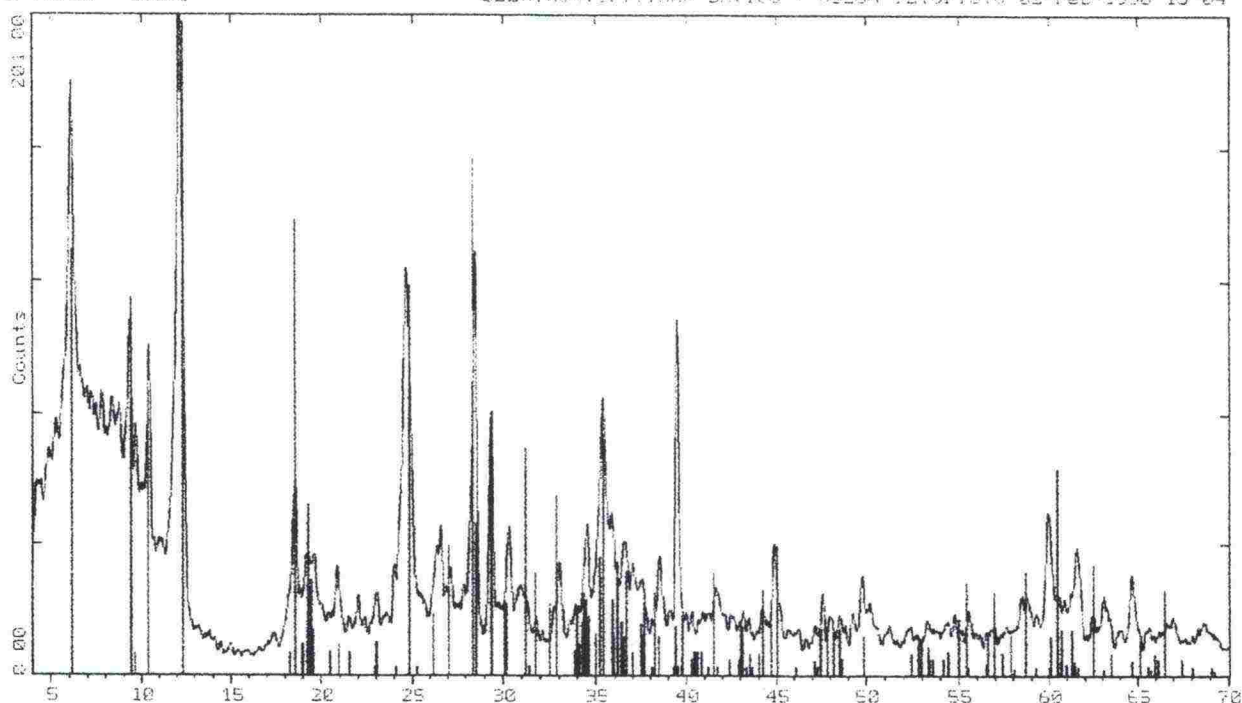
ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 02-Feb-1998 15:35



C:\GEO\KVMU1KAR.RAW KVMU1KAR.N (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
 33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
 10-0492 KAg3(Si3AlO10)(OH)2 Phlogopite T (WL: 1.5406Ao)
 9-0466 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
 20-0853 Mg5Al(Si3Al)O10(OH)8 Clinocllore IIb (WL: 1.5406Ao)
 19-0932 I KAlSi3O8 Microcline inter (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

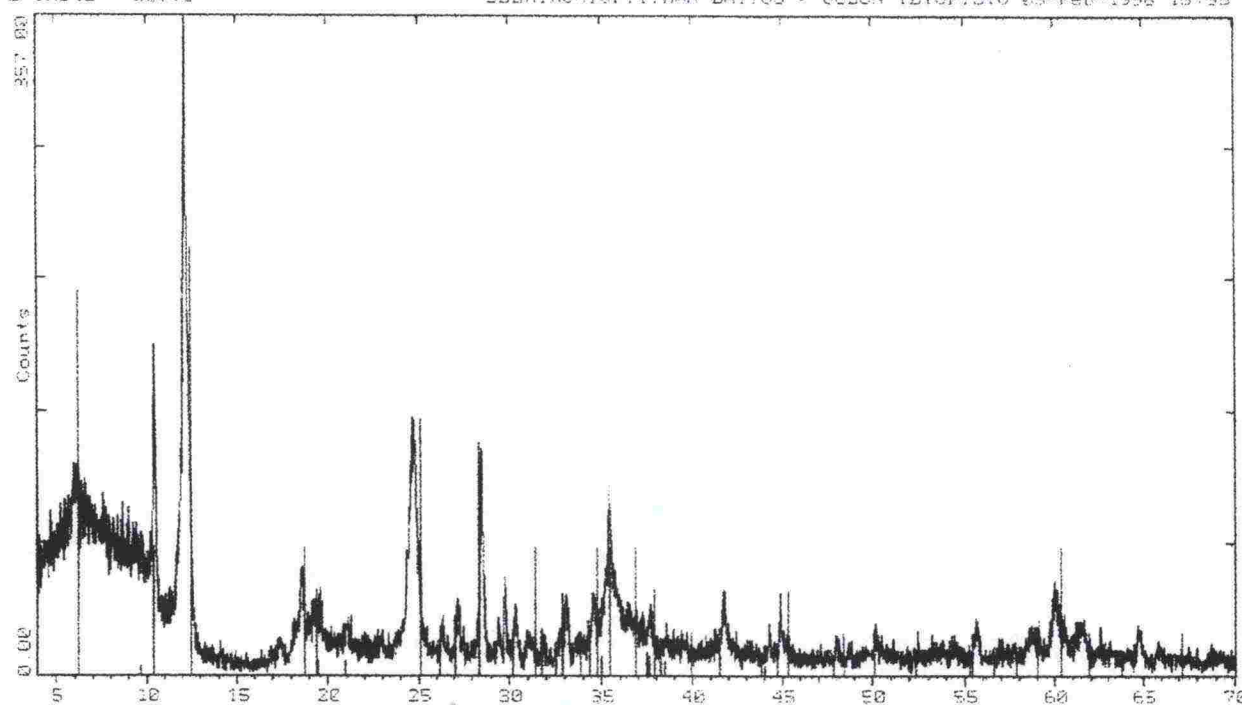
ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 02-Feb-1998 15:04



C:\GEO\KYMUSZAR\RAW\KYMUSZAR180 (CT: 0.5s, SS:0.020deg, WL: 1.5406Ao)
 29-0853 : $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})_2(\text{OH})_8$ Clinocllore lib (WL: 1.5406Ao)
 21-0149 : $\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe})_5(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ Magnesian hornblende ferroan (WL: 1.5406Ao)
 19-0770 : $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ Talc (WL: 1.5406Ao)
 19-0629 : Fe_3O_4 Magnetite syn (WL: 1.5406Ao)
 5-0586 : CaCO_3 Calcite syn (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

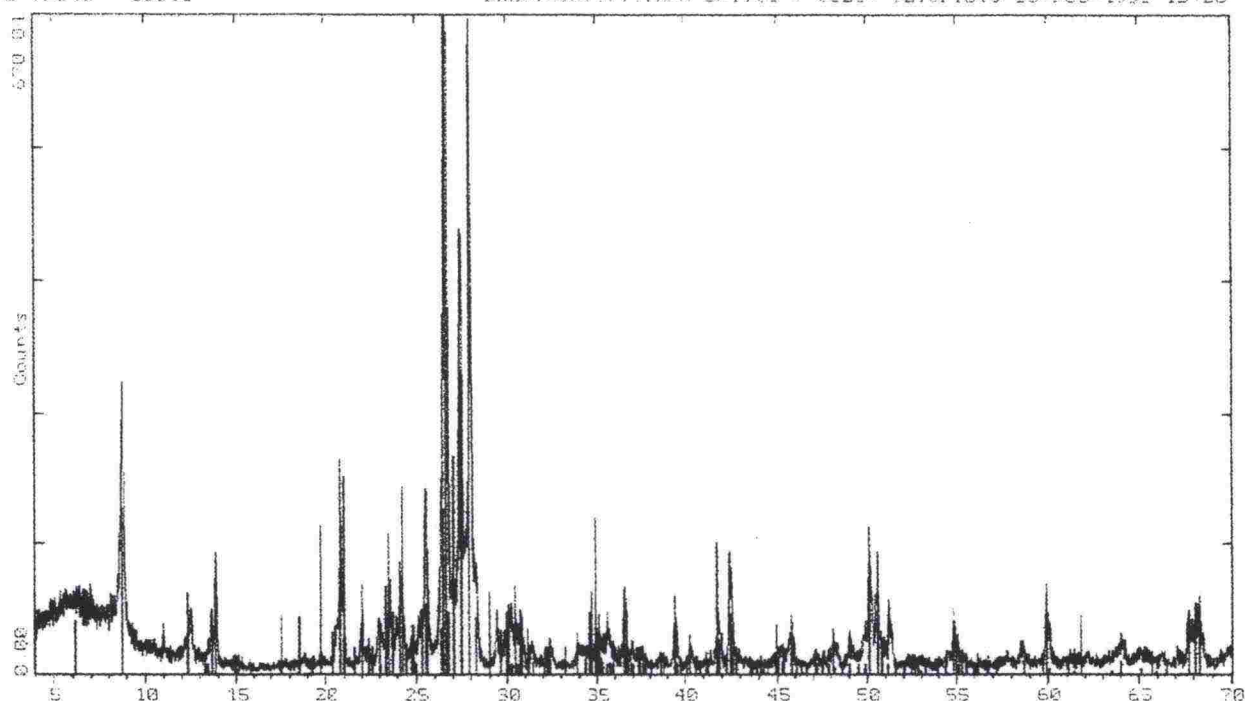
ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 02-Feb-1998 15:05



C:\GEO\KYMUSZAR\RAW\KYMUSZAR180 (CT: 0.5s, SS:0.020deg, WL: 1.5406Ao)
 21-0149 : $\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe})_5(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ Magnesian hornblende ferroan (WL: 1.5406Ao)
 29-0853 : $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})_2(\text{OH})_8$ Clinocllore lib ferroan (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

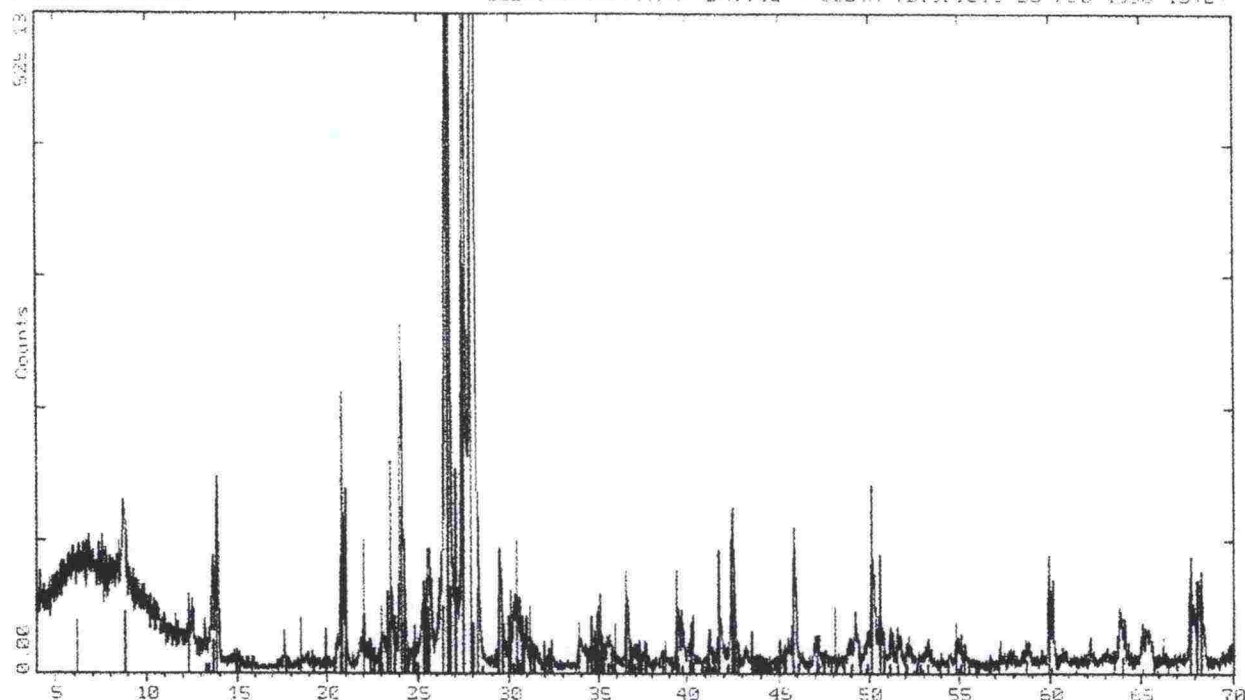
ELEKTRONI OPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 27-Feb-1998 15:28



C:\GEO\KYMUSHIE.RAW KYMUSHIENO (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
9-0466 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
19-0932 I KAlSi3O8 Microcline inter (WL: 1.5406Ao)
7-0025 I KAl2Si3AlO10(OH)2 Muscovite M syn (WL: 1.5406Ao)
29-0853 Mg5Al(Si3Al)O10(OH)8 Clinocllore IIb (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

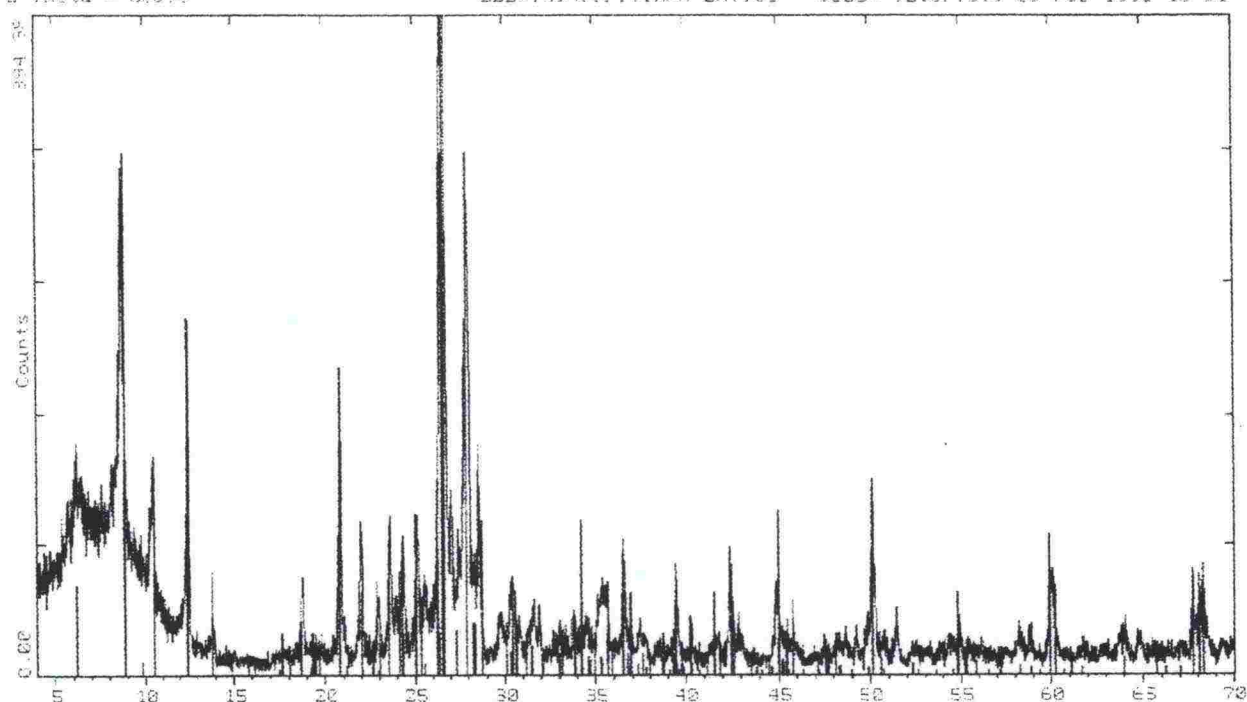
ELEKTRONI OPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 26-Feb-1998 13:07



C:\GEO\KYMUSHKAR.RAW KYMUSHKARNEA (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
9-0466 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
19-0932 I KAlSi3O8 Microcline inter (WL: 1.5406Ao)
29-0853 Mg5Al(Si3Al)O10(OH)8 Clinocllore IIb (WL: 1.5406Ao)
34-0175 C (K,Na)Al2(Si,Al)4O10(OH)2 Muscovite M (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

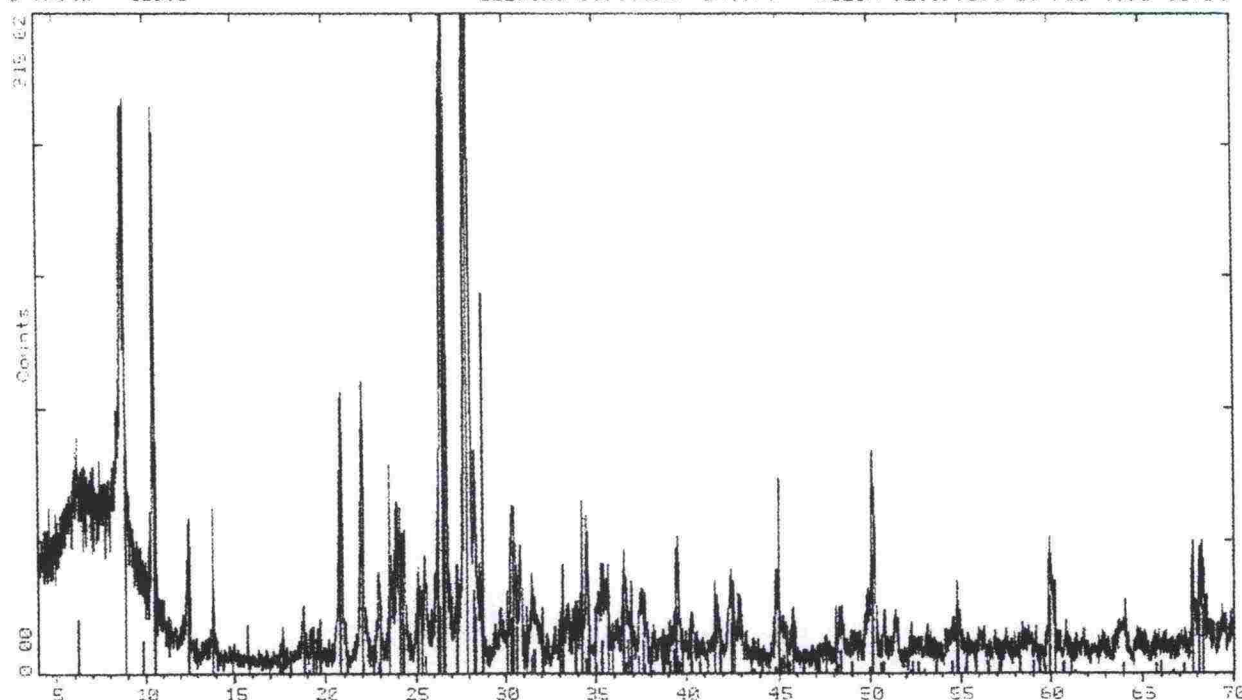
ELETRONOPTIIKAN LAITOS - OULUN YLIOPISTO 06-Feb-1998 13:51



C:\GEO\KYNM4H16.RAW KYNM4H16NO (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
 33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
 09-0466 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
 22-0712 1 (Ni,Mg,Al)6(Si,Al)4O10(OH)8 Nimitz IIb (WL: 1.5406Ao)
 20-0481 1 (Ca,Na)2.26(Mg,Fe,Al)5.15(Si,Al)8O22(OH)2 Magnesia hornblende (WL: 1.5406Ao)
 10-0495 1 KMg3(Si3AlO10)(OH)2 Phlogopite M (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

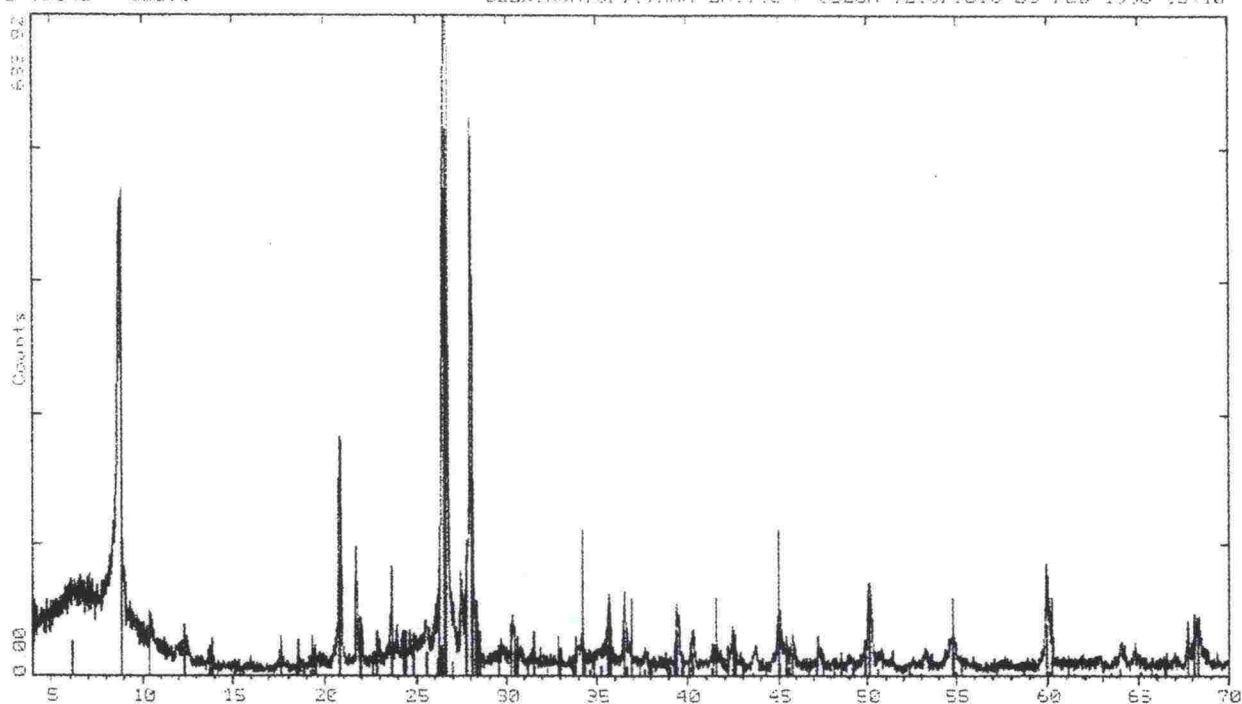
ELETRONOPTIIKAN LAITOS - OULUN YLIOPISTO 06-Feb-1998 11:04



C:\GEO\KYNM4KAR.RAW KYNM4KARKEA (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)
 33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
 09-0466 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
 29-0701 1 (Mg,Fe)6(Si,Al)4O10(OH)8 Clinoclone IIb ferroan (WL: 1.5406Ao)
 10-0495 1 KMg3(Si3AlO10)(OH)2 Phlogopite M (WL: 1.5406Ao)
 20-0481 1 (Ca,Na)2.26(Mg,Fe,Al)5.15(Si,Al)8O22(OH)2 Magnesia hornblende (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 06-Feb-1998 13:10

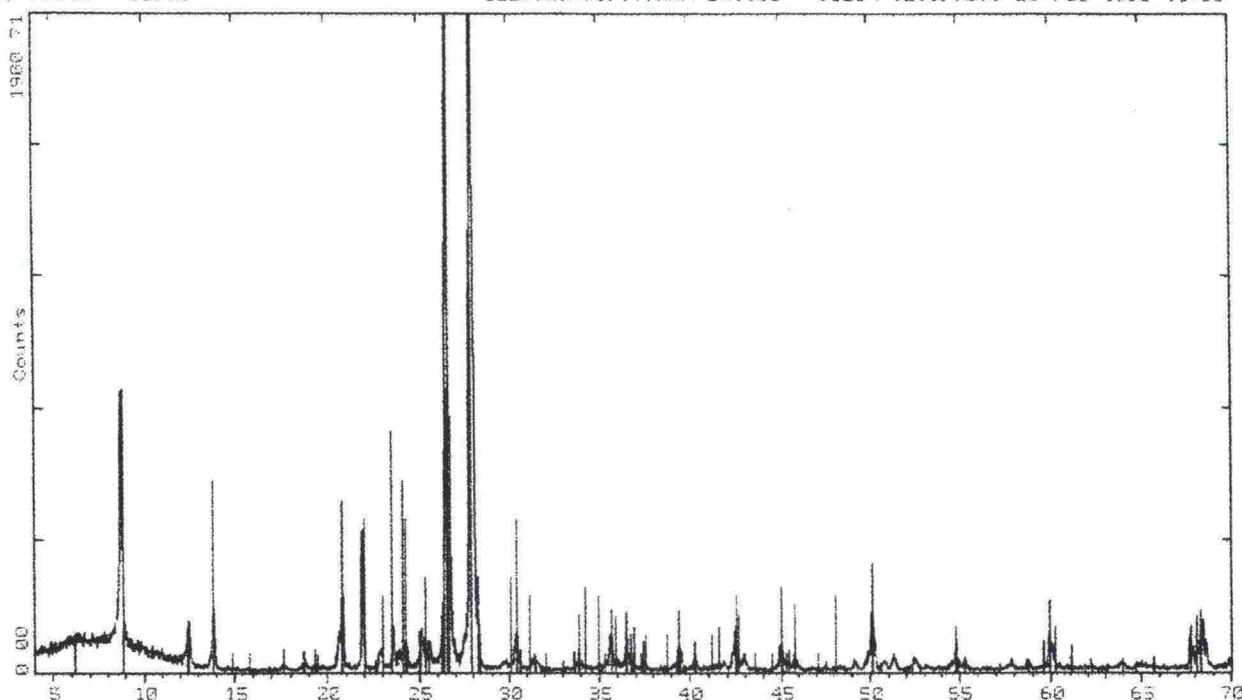


C:\GEO\KYMUSHIBNO.RAW KYMUSHIBNO (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)

33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
29-0853 * NaCa2Fe4AlSi6Al2O22(OH)2 Ferro pargasite (WL: 1.5406Ao)
29-0853 * Mg5Al(Si3Al)O10(OH)8 Clinocllore lib (WL: 1.5406Ao)
10-0495 * KMg3(Si3AlO10)(OH)2 Phlogopite M (WL: 1.5406Ao)
10-0393 * NaAlSi3O8 Albite high (WL: 1.5406Ao)

2-Theta - Scale

ELEKTRONIOPTIIKAN LAITOS / OULUN YLIOPISTO 06-Feb-1998 11:06



C:\GEO\KYMUSHAR.RAW KYMUSHARKEA (CT: 0.5s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao)

33-1161 * SiO2 Quartz low syn (WL: 1.5406Ao)
10-0456 * NaAlSi3O8 Albite low (WL: 1.5406Ao)
16-0362 (Mg,Fe,Al)(Si,Al)4O10(OH)8 Clinocllore la ferroan (WL: 1.5406Ao)
10-0495 * KMg3(Si3AlO10)(OH)2 Phlogopite M (WL: 1.5406Ao)

TIETOJA JÄÄDYTYS-SULATUS- JA VERTAILUKOEKAPPALEISTA

Taulukoissa käytettyjen merkintöjen selitykset:

Sem. pit. (%)	Sementin määrä painoprosentteina runkoaineen kuivapainosta.
nro	Rinnakkaisten koekappaleiden numeroinnissa käytetty numero.
Tiheys ρ (t/m ³)	Stabilointimassan kuivatiheys valmistusvaiheessa.
Tiiviysaste D (%)	Stabilointimassan tiheys valmistusvaiheessa verrattuna keskimmaisella sementtipitoisuudella valmistetun massan maksimitiheYTEEN.
Pit. muutos 1 Δl_a (%)	Koekappaleen pituuden muutos jäädytys-sulatus-kokeen alusta 1. jäädytys-syklin loppuun suhteessa koekappaleen pituuteen ennen kokeen alkua.
Pit. muutos 2 Δl (%)	Koekappaleen pituuden muutos jäädytys-sulatus-kokeen 1. jäädytys-syklin lopusta 12. jäädytys-syklin loppuun suhteessa koekappaleen pituuteen ennen kokeen alkua. Mikäli koekappale hajosi kokeen aikana, on ko. kohdassa ilmoitettu pituuden muutos laskettuna viimeisestä mittaustuloksesta sekä sen syklin numero suluissa, jonka aikana koekappale hajosi.
Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰) + Pit. muutos 1 Δl (‰).
Puristuslujuus σ_c (MPa)	Koekappaleen yksiaksiaalinen puristuslujuus, joka on korjattu vastaamaan sellaisen kappaleen lujuutta, jonka h/d-suhde on 1.
E-moduuli E_c (MPa)	Koekappaleen puristuslujuuden ja tiheyden perusteella laskettu E-moduuli.
Vesipit. w (p-%)	Koekappaleen gravimetrinen vesipitoisuus.
Kyllästysaste (%)	Koekappaleen kyllästysaste.
Huokoisuus n (%)	Koekappaleen huokoisuus.

s1 (28 d vertailukoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
4	1	1.039	-	-	-	-	-	-	53.0	111.1	54.7
	2	1.059	-	-	-	-	0.53	1607.7	-	-	-
	3	1.055	-	-	-	-	0.41	1410.7	-	-	-
8	1	1.085	-	-	-	-	1.41	2683.3	-	-	-
	2	1.073	-	-	-	-	-	-	50.0	107.1	55.1
	3	1.112	-	-	-	-	1.06	2383.5	-	-	-
12	1	1.150	-	-	-	-	1.58	3009.3	-	-	-
	2	1.143	-	-	-	-	-	-	44.3	104.7	52.3
	3	1.159	-	-	-	-	2.05	3457.8	-	-	-

s1 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
4	1	1.049	-	1.67	80.22 (5)	81.89	koekappale hajosi jäädytys-sulatuskokeen aikana				
	2	1.037	-	0.42	100.76 (8)	101.18	koekappale hajosi jäädytys-sulatuskokeen aikana				
	3	1.040	-	1.25	83.46 (6)	84.71	koekappale hajosi jäädytys-sulatuskokeen aikana				
8	1	1.089	-	-0.92	46.54 (6)	45.62	koekappale hajosi jäädytys-sulatuskokeen aikana				
	2	1.086	-	-0.83	38.17 (9)	37.34	koekappale hajosi jäädytys-sulatuskokeen aikana				
	3	1.086	-	-0.99	20.86 (7)	19.87	koekappale hajosi jäädytys-sulatuskokeen aikana				
12	1	1.154	-	-1.34	1.75	0.41	-	-	44.3	103.0	52.5
	2	1.138	-	-1.41	0.01	-1.40	1.69	3086.4	-	-	-
	3	1.148	-	-1.17	0.52	-0.65	1.06	2465.2	-	-	-

m1 (28 d vertailukoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
1.5	1	2.167	94.6	-	-	-	3.38	8296	-	-	-
	2	2.162	94.3	-	-	-	3.63	8578.9	-	-	-
	3	2.173	94.8	-	-	-	-	-	4.5	76.3	13.0
2.5	1	2.171	94.7	-	-	-	4.91	10017.1	-	-	-
	2	2.179	95.1	-	-	-	-	-	4.6	73.0	13.8
	3	2.160	94.3	-	-	-	5.22	10282.8	-	-	-
4.5	1	2.173	94.8	-	-	-	9.24	13763.4	-	-	-
	2	2.166	94.5	-	-	-	8.31	13009.2	-	-	-
	3	2.166	94.5	-	-	-	-	-	4.2	54.6	13.7

m1 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
1.5	1	2.155	94.0	-0.58	-0.14	-0.72	2.67	7338.7	-	-	-
	2	2.151	93.9	-0.57	-0.08	-0.65	2.4	6948.4	-	-	-
	3	2.140	93.4	-0.66	4.81	4.15	-	-	7.2	koekpl hajosi kyl.vaiheessa	
2.5	1	2.083	90.9	-0.72	1.71	0.99	3.17	7722.6	-	-	-
	2	2.120	92.5	-0.57	0.88	0.31	-	-	7.0	koekpl hajosi kyl.vaiheessa	
	3	2.125	92.7	-0.49	1.57	1.08	3.07	7760.8	-	-	-
4.5	1	2.093	91.3	-0.56	-0.28	-0.84	7.64	12058	-	-	-
	2	2.116	92.3	-0.65	-0.22	-0.87	9.57	13634.4	-	-	-
	3	2.119	92.5	-0.81	0.31	-0.50	-	-	5.5	79.7	14.8

m2 (28 d vertailukoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviyysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
1.5	1	1.975	89.2	-	-	-	1.64	5271.7	-	-	-
	2	2.085	94.2	-	-	-	1.94	6052.2	-	-	-
	3	2.087	94.3	-	-	-	-	-	4.4	50.0	18.4
2.5	1	2.087	94.3	-	-	-	3.51	8141.3	-	-	-
	2	2.090	94.4	-	-	-	-	-	4.8	55.2	18.2
	3	2.103	95.0	-	-	-	3.43	8110.7	-	-	-
4.5	1	2.100	94.9	-	-	-	7.02	11594.3	-	-	-
	2	2.082	94.1	-	-	-	6.37	10947	-	-	-
	3	2.082	94.1	-	-	-	-	-	4.6	51.7	18.5

m2 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviyysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
1.5	1	2.052	92.7	-0.73	10.99 (11)	10.26	koekappale hajosi jäädytys-sulatuskokeen aikana				
	2	2.035	91.9	-0.49	7.58 (8)	7.09	koekappale hajosi jäädytys-sulatuskokeen aikana				
	3	2.052	92.7	-0.66	8.79	8.13	-	-	-	-	-
2.5	1	2.012	90.9	-1.37	1.53	0.16	0.61	3285.9	-	-	-
	2	2.008	90.7	-0.64	1.84	1.20	-	-	10.4	102.0	20.6
	3	2.032	91.8	-0.64	3.26	2.62	koekappale hajosi jäädytys-sulatuskokeen lopussa				
4.5	1	2.019	91.2	-0.88	-0.03	-0.91	5.07	9473.5	-	-	-
	2	2.027	91.6	-0.56	-0.03	-0.59	5.18	9613.2	-	-	-
	3	2.021	91.3	-0.65	-0.09	-0.74	-	-	9.1	96.8	19.4

m3 (28 d vertailukoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
5	1	1.916	94.3	-	-	-	3.4	7357.8	-	-	-
	2	1.914	94.2	-	-	-	3.02	6933.5	-	-	-
	3	1.916	94.3	-	-	-	-	-	5.1	41.1	24.2
7	1	1.906	93.8	-	-	-	5.34	9176.2	-	-	-
	2	1.907	93.9	-	-	-	5.36	9194.7	-	-	-
	3	1.907	93.9	-	-	-	-	-	4.9	38.6	24.4
9	1	1.910	94.0	-	-	-	5.86	9631.2	-	-	-
	2	1.906	93.8	-	-	-	7.04	10536.4	-	-	-
	3	1.903	93.7	-	-	-	-	-	5.3	40.8	24.9

m3 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
5	1	1.883	92.7	-0.66	0.01	-0.65	2.74	6493.0	-	-	-
	2	1.856	91.4	-0.41	-0.32	-0.73	2.49	6097.2	-	-	-
	3	1.913	94.2	-0.67	-0.01	-0.68	-	-	11.9	98.4	23.7
7	1	1.871	92.1	-0.57	-0.18	-0.75	4.16	7943.7	-	-	-
	2	1.881	92.6	-0.58	-0.24	-0.82	4.13	7961.3	-	-	-
	3	1.882	92.6	-0.65	-0.51	-1.16	-	-	13.2	102.3	24.6
9	1	1.867	91.9	-0.66	-0.18	-0.84	-	-	12.8	101.6	24.4
	2	1.911	94.1	-0.58	-0.12	-0.70	6.24	9948.1	-	-	-
	3	1.886	92.8	-0.83	-0.27	-1.10	7.06	10443.4	-	-	-

m4 (28 d vertailukoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
5	1	1.959	94.2	-	-	-	3.41	7537.9	-	-	-
	2	1.961	94.3	-	-	-	-	-	4.9	72.1	13.4
	3	1.954	93.9	-	-	-	3.24	7326.7	-	-	-
7	1	1.952	93.8	-	-	-	5.89	9868.4	-	-	-
	2	1.949	93.7	-	-	-	5.13	9193.6	-	-	-
	3	1.966	94.5	-	-	-	-	-	4.9	53.9	17.4
9	1	1.967	94.6	-	-	-	-	-	5.2	54.7	18.6
	2	1.957	94.1	-	-	-	6.04	10020.2	-	-	-
	3	1.960	94.2	-	-	-	5.69	9966.7	-	-	-

m4 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
5	1	1.937	93.1	-0.66	0.57	-0.09	2.5	6376.6	-	-	-
	2	1.947	93.6	-0.66	-0.03	-0.69	2.59	6531.3	-	-	-
	3	1.932	92.9	-0.57	-0.11	-0.68	-	-	11.7	121.9	19.2
7	1	1.949	93.7	-0.75	0.28	-0.47	3.77	7879.5	-	-	-
	2	1.939	93.2	-0.66	0.02	-0.65	4.39	8465.8	-	-	-
	3	1.942	93.4	-0.75	0.03	-0.72	-	-	12.0	130.4	18.1
9	1	1.957	94.1	-0.50	-0.20	-0.70	5.5	9566.3	-	-	-
	2	1.943	93.4	-0.58	-0.46	-1.04	5.31	9329.3	-	-	-
	3	1.985	95.4	-0.67	-0.13	-0.80	-	-	9.2	121.1	15.3

M1 (28 d vertailukoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviyssaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.197	95.3	-	-	-	3.91	9048.2	-	-	-
	2	2.214	96.1	-	-	-	-	-	3.5	77.8	10.8
	3	2.202	95.6	-	-	-	3.31	8350.2	-	-	-
5	1	2.162	93.8	-	-	-	puristus epäonnistui		-	-	-
	2	2.225	96.6	-	-	-	7.18	12424.7	-	-	-
	3	2.182	94.7	-	-	-	-	-	3.2	74.4	10.1
	4	2.188	95.0	-	-	-	5.62	10801.6	-	-	-
7	1	2.199	95.4	-	-	-	-	-	3.0	53.6	12.7
	2	2.182	94.7	-	-	-	7.05	12068.5	-	-	-
	3	2.197	95.3	-	-	-	7.87	12841.8	-	-	-

M1 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviyssaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.164	93.9	-0.71	-0.53	-1.24	-	-	3.0	66.7	10.7
	2	2.158	93.7	-0.63	-0.39	-1.02	4.02	9012.1	-	-	-
	3	2.155	93.5	-0.55	-0.39	-0.94	5.07	10103.9	-	-	-
5	1	2.157	93.6	-0.55	-0.44	-0.99	7.8	12549.6	-	-	-
	2	2.133	92.6	-0.71	0.50	-0.21	5.21	10144.3	-	-	-
	3	2.149	93.3	-0.63	-0.44	-1.07	-	-	5.6	100.0	13.0
7	1	2.160	93.7	-0.71	-0.58	-1.29	9.74	14040.1	-	-	-
	2	2.188	95.0	-0.64	-0.28	-0.92	-	-	4.1	70.7	13.2
	3	2.184	94.8	-0.80	-0.27	-1.07	6.33	11452.9	-	-	-

M2 (28 d vertailukoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.223	95.5	-	-	-	5.14	10496.3	-	-	-
	2	2.229	95.7	-	-	-	5.51	10901.3	-	-	-
	3	2.164	92.9	-	-	-	-	-	3.3	71.7	11.2
5	1	2.218	95.3	-	-	-	11.81	15879.1	-	-	-
	2	2.207	94.8	-	-	-	10.41	14836.6	-	-	-
	3	2.194	94.2	-	-	-	-	-	3.6	69.2	12.5
7	1	2.199	94.4	-	-	-	12.55	16227.4	-	-	-
	2	2.226	95.6	-	-	-	10.41	14964.3	-	-	-
	3	2.210	94.9	-	-	-	-	-	3.2	62.8	12.1

M2 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.214	95.1	-0.72	-0.61	-1.33	-	-	3.6	67.9	12.6
	2	2.209	94.9	-0.64	-0.45	-1.09	3.74	8904.3	-	-	-
	3	2.206	94.7	-0.96	0.28	-0.68	6.15	11397.3	-	-	-
5	1	2.199	94.4	-0.64	-0.08	-0.72	8.07	13016.5	-	-	-
	2	2.203	94.6	-0.88	-0.31	-1.19	9.1	13847.1	-	-	-
	3	2.210	94.9	-0.95	-0.47	-1.42	-	-	3.0	63.8	11.2
7	1	2.236	96.0	-0.56	-0.26	-0.82	-	-	3.2	65.3	11.7
	2	2.213	95.0	-0.72	-0.46	-1.18	4.44	9712.2	-	-	-
	3	2.193	94.2	-0.87	-0.17	-1.04	8.5	13317.8	-	-	-

M3 (28 d vertailukoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.156	95.0	-	-	-	10.19	14337.6	-	-	-
	2	2.152	94.8	-	-	-	-	-	3.3	73.3	10.2
	3	2.160	95.1	-	-	-	7.17	12045.7	-	-	-
5	1	2.170	95.6	-	-	-	-	-	3.2	82.05	9.12
	2	2.158	95.0	-	-	-	10.19	14353.4	-	-	-
	3	2.148	94.6	-	-	-	11.99	15495.5	-	-	-
7	1	2.150	94.7	-	-	-	16.14	17994.3	-	-	-
	2	2.168	95.5	-	-	-	13.5	16598.3	-	-	-
	3	2.143	94.4	-	-	-	-	-	2.9	72.5	9.1

M3 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.126	93.6	-0.39	-0.21	-0.60	6.32	11134.5	-	-	-
	2	2.142	94.3	-0.79	-0.11	-0.90	4.7	9670.7	-	-	-
	3	2.138	94.2	-0.48	-0.07	-0.55	-	-	3.6	69.2	11.5
5	1	2.166	95.4	-0.48	-0.44	-0.92	10.9	14896.2	-	-	-
	2	2.174	95.7	-0.48	-0.37	-0.85	-	-	3.3	75.0	10.2
	3	2.175	95.8	-0.56	-0.24	-0.80	11.55	15396.8	-	-	-
7	1	2.154	94.9	-0.48	-0.20	-0.68	9.38	13747.2	-	-	-
	2	2.151	94.7	-0.56	-0.22	-0.78	9.89	14092.1	-	-	-
	3	2.160	95.1	-0.56	0.32	-0.24	-	-	3.1	73.8	9.7

M4 (28 d vertailukoekappaleet)

Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.206	95.1	-	-	-	9.81	14397.3	-	-	-
	2	2.198	94.7	-	-	-	9.8	14336.0	-	-	-
	3	2.209	95.2	-	-	-	-	-	3.3	71.7	10.8
5	1	2.191	94.4	-	-	-	12.74	16290.3	-	-	-
	2	2.204	95.0	-	-	-	12.05	15937.5	-	-	-
	3	2.205	95.0	-	-	-	-	-	3.2	64.0	12.0
7	1	2.211	95.3	-	-	-	15.03	17860.0	-	-	-
	2	2.219	95.6	-	-	-	-	-	2.8	68.3	10.0
	3	2.194	94.6	-	-	-	17.61	19180.6	-	-	-

M4 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

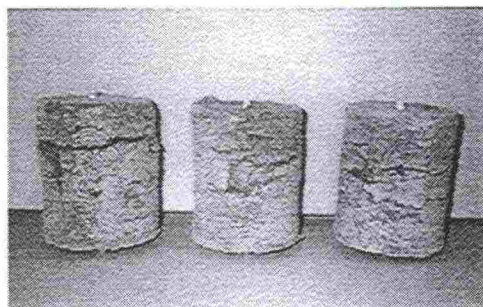
Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.190	94.4	-0.47	0.24	-0.23	-	-	2.9	70.7	9.9
	2	2.173	93.7	-0.72	-0.15	-0.87	9.41	13888.0	-	-	-
	3	2.209	95.2	-0.72	-0.49	-1.21	11.63	15688.7	-	-	-
5	1	2.219	95.6	-0.40	-0.25	-0.65	-	-	3.0	69.8	10.3
	2	2.192	94.5	-0.80	-0.06	-0.86	11.35	15387.8	-	-	-
	3	2.217	95.6	-0.72	-0.36	-1.08	12.84	16552.1	-	-	-
7	1	2.189	94.4	-0.71	-0.18	-0.89	13.81	16950.5	-	-	-
	2	2.210	95.3	-0.64	-0.37	-1.01	-	-	2.9	67.4	10.4
	3	2.189	94.4	-0.64	-0.20	-0.84	16.63	18594.3	-	-	-

M5 (28 d vertailukoekappaleet)

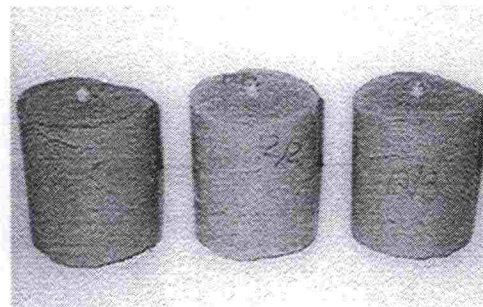
Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.191	95.2	-	-	-	-	-	2.2	39.3	12.9
	2	2.268	98.5	-	-	-	5.63	11211.4	-	-	-
	3	2.185	94.9	-	-	-	4.18	9302.3	-	-	-
5	1	2.186	95.0	-	-	-	5.42	10604.1	-	-	-
	2	2.179	94.7	-	-	-	5.47	10613.7	-	-	-
	3	2.174	94.4	-	-	-	-	-	3.3	60.0	12.5
7	1	2.145	93.2	-	-	-	6.12	11051.1	-	-	-
	2	2.193	95.3	-	-	-	-	-	3.1	55.4	12.8
	3	2.187	95.0	-	-	-	7.5	12475.2	-	-	-

M5 (jäädytys-sulatuskoekappaleet)

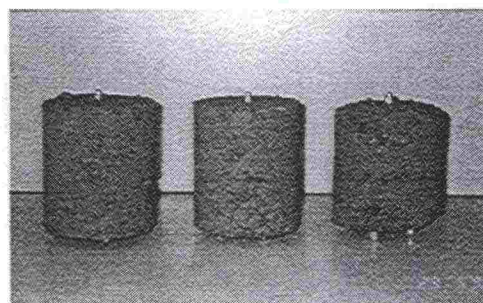
Sem. pit. (%)	nro	Tiheys ρ (t/m ³)	Tiiviysaste D (%)	Pit. muutos 1 Δl_a (‰)	Pit. muutos 2 Δl (‰)	Pit. muutos yht. Δl_{yht} (‰)	Puristuslujuus σ_c (MPa)	E-moduuli E_c (MPa)	Vesipit. w (p-%)	Kyllästysaste (%)	Huokoisuus n (%)
3	1	2.146	93.2	-0.63	-0.37	-1.00	-	-	5.7	89.1	14.4
	2	2.158	93.7	-0.47	-0.32	-0.79	3.27	8130.3	-	-	-
	3	2.164	94.0	-0.63	-0.40	-1.03	3.66	8630.9	-	-	-
5	1	2.146	93.2	-0.72	0.04	-0.68	4.32	9294.3	-	-	-
	2	2.193	95.3	-0.48	-0.22	-0.70	4.24	9409.2	-	-	-
	3	2.129	92.5	0.47	-0.82	-0.35	-	-	3.2	65.3	11.0
7	1	2.150	93.4	-0.71	-0.28	-0.99	5.82	10806.2	-	-	-
	2	2.181	94.7	-0.95	-0.05	-1.00	-	-	-	-	-
	3	2.182	94.8	-0.63	-0.27	-0.90	6.77	11825.9	3.6	63.2	13.1



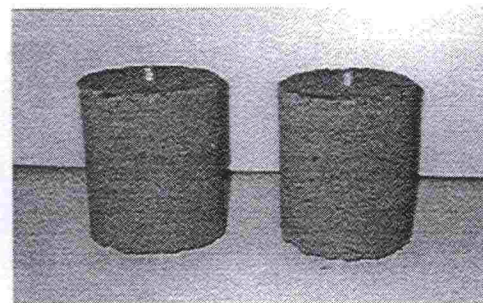
s1 4/1 4/2 4/3
4. jäädytysjakson jälkeen



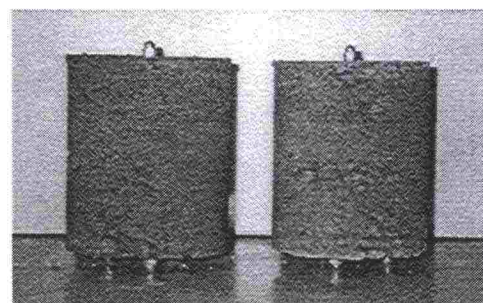
s1 12/1 12/2 12/3



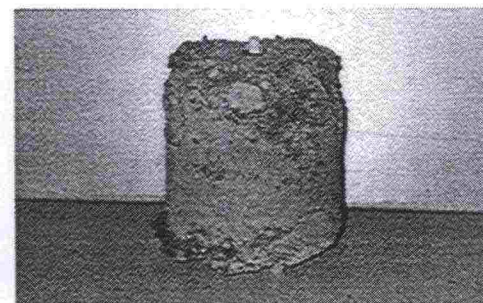
m1 1,5/1 1,5/2 1,5/3



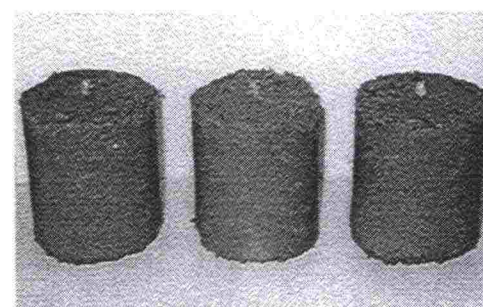
m1 2,5/1 2,5/2



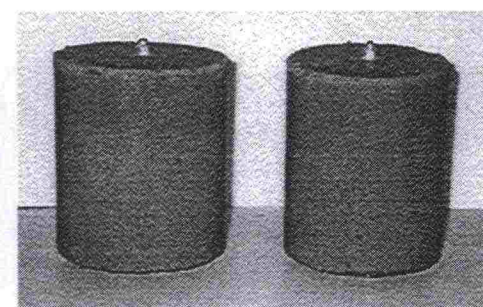
m1 4,5/1 4,5/2



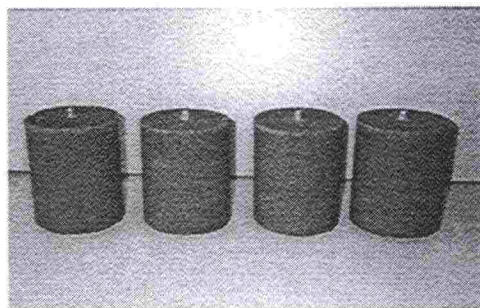
m2 1,5/3



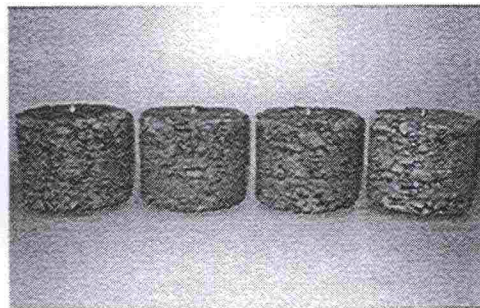
m2 2,5/1 2,5/2 2,5/3



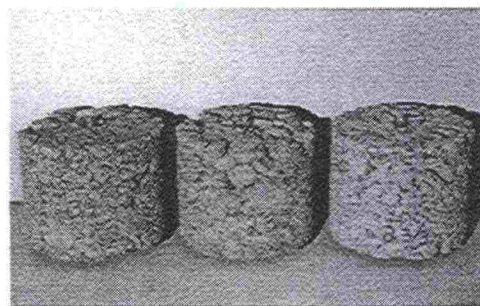
m3 5/1 5/2



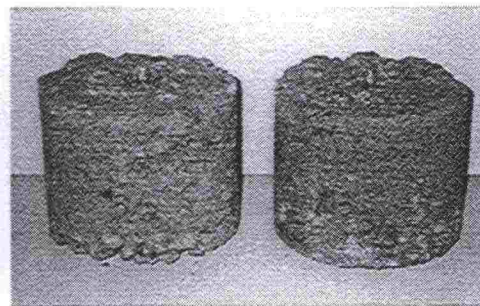
m4 5/1 7/1 7/2 7/3



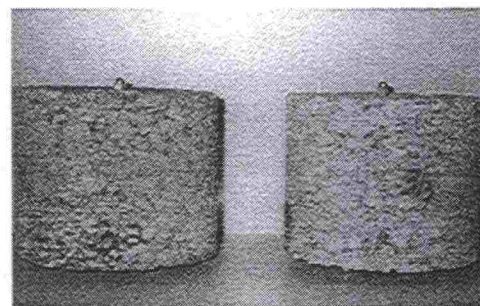
M1 3/1 3/2 3/3 7/1



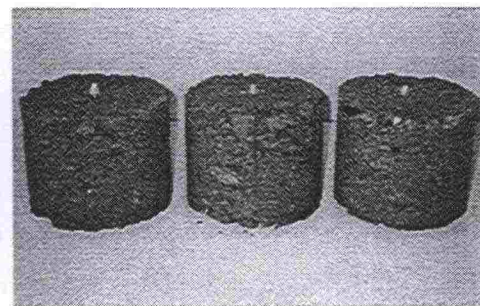
M2 3/1 3/2 3/3



M3 3/2 3/3



M4 3/2 3/3



M5 3/1 3/2 3/3

HALKAISUVETOLUJUUDET

Materiaali	Sem. pit. (%)	nro	Halkaisuvetolujuus $\sigma_{it,28d}$ (MPa)	Halkaisuvetolujuus $\sigma_{it,j-s}$ (MPa)
s1	8	1	0.18	0.01
		2	0.23	0.05
m1	2.5	1	0.61	0.59
		2	0.47	koe epäonnistui
m2	2.5	1	0.29	0.17
		2	0.28	0.18
m3	7	1	0.28	0.26
		2	koe epäonnistui	0.37
m4	7	1	koe epäonnistui	0.43
		2	0.17	0.50
M1	5	1	0.71	0.71
		2	0.75	0.58
M2	5	1	1.02	0.75
		2	0.93	0.92
M3	5	1	1.02	0.91
		2	0.98	0.63
M4	5	1	0.92	0.71
		2	0.92	0.78
M5	5	1	0.46	0.34
		2	0.46	0.41

Taulukossa käytettyjen merkintöjen selitykset:

Materiaali	Stabiloidun materiaalin runkoaineen tunnus.
Sem. pit. (%)	Sementin määrä painoprosentteina runkoaineen kuivapainosta.
nro	Rinnakkaisten koekappaleiden numeroinnissa käytetty numero.
Halkaisuvetolujuus $\sigma_{it,28d}$ (MPa)	Halkaisuvetolujuus 28 vrk:n iässä.
Halkaisuvetolujuus $\sigma_{it,j-s}$ (MPa)	Halkaisuvetolujuus jäädytys-sulatuskokeen jälkeen.

VEDENLÄPÄISEVYYDET

Materiaali	Sem. pit. (%)	nro	Vedenläpäisevyyskerroin $k_{20^{\circ}\text{C},28\text{d}}$ (10^x m/s)	Vedenläpäisevyyskerroin $k_{20^{\circ}\text{C},j-s}$ (10^x m/s)
s1	8	1	-9.4	-8.5
		2	-9.5	-8.1
m1	2.5	1	-7.1	-8.1
		2	-7.2	-10.2
m2	2.5	1	-7.9	-7.7
		2	-8.3	-8.0
m3	7	1	-7.9	-8.1
		2	-7.8	-8.1
m4	7	1	-8.1	-7.7
		2	-8.0	-7.8

Taulukossa käytettyjen merkintöjen selitykset:

Materiaali	Stabiloidun materiaalin runkoaineen tunnus.
Sem. pit. (%)	Sementin määrä painoprosentteina runkoaineen kuivapainosta.
nro	Rinnakkaisten koekappaleiden numeroinnissa käytetty numero.
Vedenläpäisevyyskerroin $k_{20^{\circ}\text{C},28\text{d}}$ (10^x m/s)	Vedenläpäisevyyskerroin 28 vrk:n iässä.
Vedenläpäisevyyskerroin $k_{20^{\circ}\text{C},j-s}$ (10^x m/s)	Vedenläpäisevyyskerroin jäädytys-sulatuskokeen jälkeen.

TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
- 5/1993 Arktinen tienrakentaminen, Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. TIEL 3100011
- 2/1994 Routanousun mallintaminen, kirjallisuusselvitys. TIEL 3100013

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 28/1994 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Vuoden 1993 kuormituskokeet. TIEL 3200238
- 30/1994 Kallioleikkaukset. TIEL 3200240
- 45/1994 Maan routimisen termomekaaninen malli ja sen laskelmat. TIEL 3200254
- 53/1994 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, loppuraportti. TIEL 3200262
- 3/1995 Kuormituskestävyyden tavoitekriteerit. TIEL 3200281
- 15/1995 Betonipäällysteen seuranta, vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 2. TIEL 3200293
- 20/1995 Sään ja hydrologisten tekijöiden vaikutus kevätkelirikkoon. TIEL 3200298
- 30/1995 TPPT:n laatusuunnitelma. TIEL 3200308
- 43/1995 Tukitelineperustusten kantokyky. TIEL 3200319
- 44/1995 Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. TIEL 3200320
- 45/1995 Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. TIEL 3200321
- 54/1995 Veittotensuon koerakenteen toiminta ja laadun arviointi. TIEL 3200330
- 58/1995 Kestävän kehityksen tierakenteet - ideakilpailu. TIEL 3200333
- 94/1995 Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. TIEL 3200369
- 6/1996 Tuotannon laatu; Kuormitus ja routakestävyysrakenteet. TIEL 3200375
- 13/1996 Masuunihiekkastabilointi. TIEL 3200382
- 16/1996 Tavoitekriteerit (TPPT). TIEL 3200385
- 17/1996 Moreenin hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin (TPPT). TIEL 3200386
- 29/1996 Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla. TIEL 3200397
- 32/1996 Häiriintymättömien maanäytteiden otto. TIEL 3200400
- 33/1996 Ödometrikoe. TIEL 3200401
- 34/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Täydentävien kuormituskokeiden tulokset, osa 1. TIEL 3200402
- 35/1996 Havaintoteiden asfalttipäällysteiden moduulit. TIEL 3200403
- 36/1996 Eriste- ja kevennysmateriaalien routakestävyys; Palaturve. TIEL 3200404
- 37/1996 Koerakennekohteiden materiaalien routakestävyys; Pohjoiset kohteet. TIEL 3200405

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 38/1996 Rakennerratkaisujen alustava suunnittelu ja kehittäminen. TIEL 3200406
- 39/1996 Pilari- ja massastabiloinnin tuotantotekniikka. TIEL 3200407
- 44/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Muutosmoduulin arviointi korkearakeisilla kiviaineksilla, osa 2. TIEL 3200412
- 46/1996 LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina. TIEL 3200414
- 70/1996 Kantavan kerroksen asfalttibetoni; Referenssimateriaalin ominaisuudet. TIEL 3200437
- 77/1996 Syvästabilointi kehittyvänä pohjavahvistusmenetelmänä; International Conference IS-Tokio '96. TIEL 3200444
- 78/1996 Moreenin rakeistaminen pellettoimalla; Nykytilaselvitys. TIEL 3200445
- 4/1997 Siltojen perustusten geoteknisen mitoituksen vertailu eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200452
- 5/1997 Tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen vertailevat mitoituslaskelmat eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200453
- 11/1997 Betonipäällysteen seuranta vt 4 Kempele-Kiviniemi. Kuntoraportti TIEL 3200458
- 23/1997 Masuunihiekan käyttö päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200470
- 30/1997 Teiden pohjavesisuojausissa käytettävien maatiivisteiden vedenläpäisevyyden määrittäminen. TIEL 3200476
- 35/1997 Palaturpeen käyttö tierakenteessa. TIEL 3200481
- 23/1998 Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 1: Sementillä sidotut materiaalit, kirjallisuusselvitys. TIEL 3200514
- 24/1998 hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 2: Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyys. TIEL 3200515
- 25/1998 Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 3: Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen. TIEL 3200516
- 29/1998 Sementtistabiloidut materiaalit, loppuraportti. TIEL 3200521
- (Geotekniikan informaatiojulkaisuja:)**
- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150
- 39/1994 Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. TIEL 3200248
- 42/1994 Nauhapystyöjitus. TIEL 3200251
- 67/1994 Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. TIEL 3200276
- 79/1995 Tieleikkausten pohjatutkimukset. TIEL 3200354
- 79/1996 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200446
- 18/1997 Syvästabiloinnin mitoitusohje. TIEL 3200465
- 28/1997 Tien kevennysrakenteet. TIEL 3200475